

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Tomislav Prosinečki

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Ivan Čatipović, dipl. ing.

Student:

Tomislav Prosinečki

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.


Prije svega veliko HVALA mojoj obitelji na bezuvjetnoj podršci, neizmjernom strpljenju te velikoj potpori i razumijevanju koje su pokazivali za čitavo vrijeme mog, mrvicu produženog, studija.

Zahvaljujem se svojem mentoru Doc.dr.sc Ivanu Čatipoviću, dipl.ing. na svim korisnim savjetima i vodstvu koji su mi uvelike pomogli pri izradi ovog rada. Također želim se zahvaliti kolegici Ivani Martić na vrijednim savjetima, te kolegama Alenu Cukrovu, Innu Gatinu i Vuki Vukčeviću na kratkom, ali izuzetno zanimljivom izletu u svijet CFD-a.

Hvala svim profesorima i nastavnicima koji su za cijelo vrijeme mog studija veliki trud uložili ne bi li svima nama studentima prenijeli svoja znanja, vještine i iskustva te nas pripremili za nadolazeća krstarenja morima naše prekrasne brodograđevne struke.

Hvala i tebi Bože na svim talentima, usađenoj upornosti i strpljenju koje si mi podario kako bi mi ovo, uspješno završeno, studentsko doba ostalo u prekrasnom sjećanju.

HVALA!!



Tomislav Prosinečki



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija brodogradnje



Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tomislav Prosinečki** Mat. br.: 0035177894

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **UTJECAJ KUTA NAGIBA NA POMORSTVENE KARAKTERISTIKE JEDRILICE**

Naslov rada na engleskom jeziku: **INFLUENCE OF HEELING ANGLE ON SAILING YACHT SEAKEEPING CHARACTERISTICS**

Opis zadatka:

Jedrilice za vrijeme plovidbe pod jedrima imaju značajan poprečni nagib. U diplomskom radu potrebno je istražiti utjecaj nagiba na gibanje jedrilice koje uzrokuju valovi. Također treba istražiti utjecaj nagiba na dodatni otpor uslijed valova. Proračun se treba temeljiti na teoriji potencijalnog strujanja uz primjenu metode rubnih elemenata (eng. boundary element method).

U okviru diplomskog rada potrebno je:

1. Dati pregled literature te odabrati formu jedrilice.
2. Proračunati prenosne funkcije odziva broda za zadane nagibe.
3. Proračunati silu dodatnog otpora uslijed valova za zadane nagibe.
4. Napraviti sistematičan prikaz dobivenih rezultata.

Napomena: U radu koristiti programski paket HydroSTAR (Bureau Veritas) dostupan na FSB-u.

Zadatak zadan:
10. ožujka 2016.

Rok predaje rada:
12. svibnja 2016.

Predviđeni datumi obrane:
18., 19. i 20. svibnja 2016.

Zadatak zadao:

Čatipović
Doc. dr. sc. Ivan Čatipović

Predsjednica Povjerenstva:
Nastja Degiuli
Prof. dr. sc. Nastja Degiuli

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA	IV
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD.....	1
1.1. Osnove hidrodinamičkih i aerodinamičkih značajki jedrilice.....	2
1.2. Pregled literature	4
1.3. Definiranje problema i postavljanje cilja	5
2. ODABIR FORME I EKPERIMENTALNI REZULTATI	7
2.1. Odabir forme trupa jedrilice.....	8
2.2. Postavljanje i opis eksperimenata	10
3. TEORIJA POTENCIJALNOG STRUJANJA I GIBANJE BRODA NA VALOVIMA 13	
3.1. Teorija potencijalnog strujanja.....	13
3.2. Gibanje broda na valovima	16
4. NUMERIČKO MODELIRANJE I OBRADA REZULTATA	21
4.1. Opis postupka modeliranja.....	21
4.2. Prikaz i obrada rezultata.....	25
5. USPOREDBA REZULTATA	28
6. ZAKLJUČAK.....	31
LITERATURA.....	32
PRILOZI.....	33
PRILOG I – Prikaz rezultata	34
PRILOG II – Približna metoda procjene dodatnog otpora valova	41

POPIS SLIKA

Slika 1.	Spreg hidrodinamičkih i aerodinamičkih sila [3]	3
Slika 2.	Sysser 43 – bočni pogled	8
Slika 3.	Sysser 45 – bočni pogled	8
Slika 4.	Nacrt rebara formi Sysser 43 i Sysser 45	9
Slika 5.	Prikaz postavljenog eksperimenta [8]	11
Slika 6.	Stupnjevi slobode gibanja broda na valovima [1]	16
Slika 7.	Diskretizacija forme #43 u uspravnom položaju mrežom panela	22
Slika 8.	Diskretizacija forme #45 u uspravnom položaju mrežom panela	22
Slika 9.	Diskretizacija forme #43 u nagnutom položaju mrežom panela	23
Slika 10.	Diskretizacija forme #45 u nagnutom položaju mrežom panela	23
Slika 11.	Neujednačen raspored panela na krmi forme Sysser #43	24
Slika 12.	Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje	29
Slika 13.	Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje	29
Slika 14.	Dodatni otpor valova za formu Sysser #45	30

POPIS TABLICA

<i>Tablica 1.</i>	<i>Osnovne hidrostatske značajke formi Sysser 43 i Sysser 45.....</i>	<i>9</i>
<i>Tablica 2.</i>	<i>Značajni bezdimenzijski koeficijenti formi #43 i #45</i>	<i>10</i>
<i>Tablica 3.</i>	<i>Kutevi trima korišteni u eksperimentu i simulaciji</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 4.</i>	<i>Popis uspoređivanih metoda</i>	<i>26</i>
<i>Tablica 5.</i>	<i>Prikaz mjernih veličina i jedinica korištenih u dijagramima.....</i>	<i>26</i>

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_{jk}		Matrica pridruženih masa vode
B_{jk}		Matrica hidrodinamičkog prigušenja
C_{jk}		Matrica krutosti povratnih sila
M_{jk}		Matrica mase tijela
v_n	m/s	Brzina strujanja u smjeru normale
F_C	N	Vektor hidrostatičke sile
F_U	N	Vektor rezultirajuće uzbudne sile
M_C	Nm	Vektor hidrostatičkog momenta
M_U	Nm	Vektor rezultirajućeg uzbudnog momenta
A_w	m ²	Površina vodne linije
A_x	m ²	Površina glavnog rebra
B_{WL}	m	Širina na vodnoj liniji
c	m/s	Fazna brzina
d	m	Dubina bazena
g	m/s ²	Gravitacijska konstanta
H	m	Visina vala
k	rad/m	Valni broj
L_{WL}	m	Duljina među okomicama
p	Pa	Konstantni tlak
R_{aw}	N	Dodatni otpor valova
S_C	m ²	Oplakana površina trupa
T_C	m	Gaz golog trupa
x_B	m	Uzdužna koordinata ežišta vodne linije
x_G	m	Uzdužna koordinata ežišta broda
Δ	m ³	Istisnina trupa
ζ_a	m	Valna amplituda
η_3	m	Amplituda poniranja

η_5	m	Amplituda postranja
Φ		Potencijal brzine strujanja
Φ_W		Potencijal brzine strujanja vala
Φ_0		Potencijal brzine strujanja nailaznog vala
Φ_7		Potencijal brzine strujanja difrakcijske komponente vala
\mathbf{v}	m/s	Vektor brzine strujanja fluida
α	m/m	Valna strmina
ζ	m	Elevacija slobodne površine
ρ	kg/m ³	Gustoća vode u bazenu
ω	rad/s	Kružna valna frekvencija

SAŽETAK

Jedrilice se smatraju teorijski jednim od najsloženijih plovniha objekata, upravo iz razloga što plove na granici dvaju fluida, vode i zraka. Predstavljaju točku ravnoteže hidrodinamičkih sila trupa i aerodinamičkih sila jedara. Uz pretpostavku da jedrilicu možemo promatrati kao kruto tijelo koje se giba, hidrodinamičke sile trenutno će i značajno utjecati na aerodinamičke komponente i obrnuto. Budući da često plovi u nagnutom položaju, iznimno je važno poznavati prirodu njenog ponašanja na valovima, kako u uspravnom tako i u nagnutom položaju.

U ovome radu, problemu pomorstvenosti jedrilice u uspravnom i nagnutom stanju pristupilo se koristeći *metodu rubnih elemenata* (eng. *boundary element method*) koja se temelji na potencijalnom strujanju fluida i linearnoj teoriji valova. Promatran je odziv dviju formi iz sustavne serije *Delft Systematic Yacht Hull Series*, u uspravnom i nagnutom stanju, za dvije brzine napredovanja i pet valnih duljina. Svi rezultati uspoređeni su s dostupnim eksperimentalnim podacima. U dodatku, na primjeru jednog broda i jedne brzine, problemu se pristupilo koristeći i približnu metodu regresijskih polinoma razvijenu baš za navedenu seriju trupova.

Ključne riječi: jedrilica, jahta, pomorstvenost, utjecaj kuta nagiba, DSYHS, potencijalno strujanje, metoda rubnih lemenata

SUMMARY

In theory sailing yachts are one of the most complex floating objects designed today. Their complexity lies in the fact that they sail in two fluids at the same time, water and air. They are equilibrium point between hydrodynamic forces produced by hull motion in the water and aerodynamic forces induced by the sails sailing in the wind. Assuming the sailing yacht a moving rigid body, hydrodynamic forces will significantly influence aerodynamic forces and vice versa. Since sailing yachts are designed to sail in heeled position, it is obligatory to familiarize with predicting the nature of their motion in waves, both in upright and heeled condition.

This thesis approaches the problem of sailing yacht seakeeping characteristics using the *Boundary Element Method*, based on potential flow and linear wave theories. Two *Delft Systematic Yacht Hull Series* hull forms have been observed, in upright and heeled condition, for two sailing speeds and five wave lengths. All the numerical results have been compared to available experimental towing tank results. In appendix, as an example, the problem has been approached using approximation regression polynomial method developed specifically for above mentioned hull series. One hull form and one speed have been investigated by this method.

Key words: sailing yacht, heel angle influence, DSYHS, potential flow theory, boundary element method

1. UVOD

Jedrilice, iako koriste prirodnu vrstu pogona, veoma su složene i njihovo ponašanje izuzetno je teško opisati matematičkim modelima pa se stoga smatraju jednim od najsloženijih vrsta brodova, ali i tehničkih objekata općenito. Složenost proučavanja i predviđanja njihovog ponašanja u naravi leži u činjenici da se jedrilica giba na granici dvaju fluida. Gibajući se kroz vodu njezin trup nalazi se pod utjecajem hidrodinamičkih sila, dok njezina jedra i nadvođe plove kroz zrak udovoljavajući aerodinamičkim silama. Prema drugom Newtonovom zakonu, jedrilica čije su hidrodinamičke i aerodinamičke sile u ravnoteži, gibat će se jednolikom brzinom pravocrtno; u suprotnom ona će ubrzavati ili usporavati sve dok ne dostigne ravnotežno stanje. Prilikom promatranja ponašanja jedrilice nemoguće je odvojeno promatrati pojedine segmente, međutim zbog kompleksnosti problema, prisiljeni smo koristiti se inženjerskim metodama, pojednostavljivanjima i pretpostavkama, kako bismo složen problem pojednostavili i učinili ga rješivim pomoću dostupnih metoda.

U uobičajenoj inženjerskoj praksi danas, kaotični i nepredvidivi parametri često su maksimalno pojednostavljivani: smjer vjetra smatra se konstantnim po intenzitetu i smjeru, površina vode uvijek je mirna i ravna, a mornari uvijek donose optimalne odluke. Također, uvijek se promatra pravocrtno gibanje jedrilice, ne uzimajući u obzir nužno potrebne maneuvre koji su uobičajena i nužna rutina u svakodnevnoj realnoj plovidbi svake jedrilice. Navedene pretpostavke sastavni su dio tzv. *VPP (Velocity Prediction Program)* softverskih paketa koji se još uvijek koriste prilikom projektiranja suvremenih jedrilica. *VPP* programi nastali su sustavnim proučavanjem ponašanja postojećih jedrilica u naravi i formiranjem iskustvenih matematičkih izraza koji daju zadovoljavajuću točnost za karakteristične jedrilice.

Međutim, problemi odziva jedrilice na promjene smjera i jačine vjetra, ponašanja jedrilica na valovima, utjecaj valova na aerodinamičke sile jedara, te problem upravljivosti jedrilica tijekom plovidbe na jedra, tek nedavno su postali predmet istraživanja.

U nastavku ovoga poglavlja dan je sažet prikaz trenutno aktualne literature koja se odnosi na probleme pomorstvenosti jedrilice i određivanje dodatnog otpora valova, a koji su i tema ovoga rada.

1.1. Osnove hidrodinamičkih i aerodinamičkih značajki jedrilice

Jedrilica se giba kroz dva medija: vodu i zrak. Dok njezina jedra, zahvaljujući aerodinamičkim silama, ostvaruju poriv; na podvodni dio trupa jedrilice djeluju hidrodinamičke sile i uzrokuju otpor. Da bismo bolje razumijeli ponašanje jedrilice, potrebno je upoznati se s osnovnim fizikalnim pojavama koje djeluju na pojedine dijelove jedrilice.

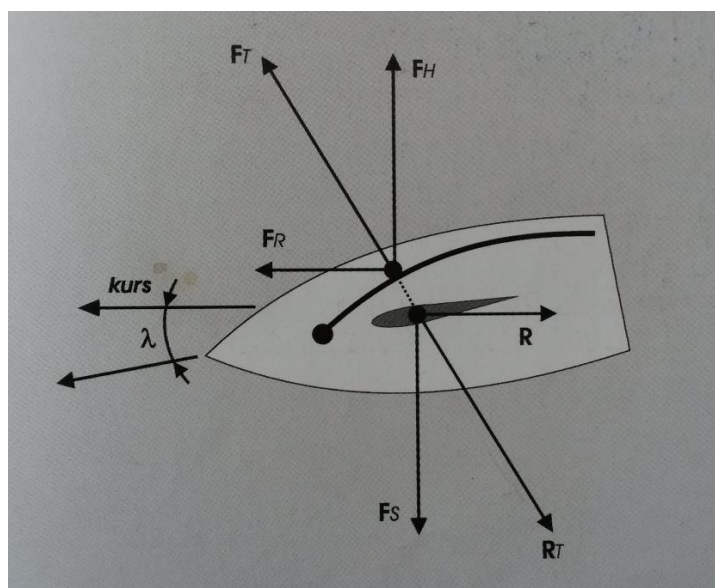
Analiza hidrodinamičkih i aerodinamičkih sila na jedrilicu uvijek se radi za jedrenje uz vjetar. U tom slučaju, problem aerodinamičke učinkovitosti jedara i hidrodinamičke učinkovitosti trupa, zajedno sa otporom trupa i problemom stabiliteta, je najizraženiji.

Jedrenje „uz vjetar“ fraza je prihvaćena od strane jedriličara, a označava specifičan smjer kretanja jedrilice u odnosu na prividni vjetar, koji se (za promatrača na brodu) razlikuje od stvarnog vjetra. Smjer i brzina stvarnog vjetra one su orijentacije i vrijednosti vjetra koje mjeri mjeritelj koji NEPOMIČNO stoji u globalnom inercijskom sustavu. Odnosno to su smjer i brzina vjetra koje bi mjerio mjeritelj koji mirno stoji na površini vode dok vjetar „puše preko njega“. Za razliku od nepomičnog mjeritelja, jedriličar koji upravlja jedrilicom i koja plovi nekom brzinom, osjeća prividni vjetar. Smjer i iznos brzine toga vjetra vektorski je zbroj vektora stvarnog vjetra i vektora brzine jedrilice.

Budući da se jedra gibaju brzinom broda, aerodinamička sila jedara posljedica je prividnog vjetra. Posljedično i smjer plovidbe u odnosu na vjetar određuje se naspram prividnog vjetra. Stoga „jedrenje uz vjetar“ obuhvaća kut jedrenja $30^\circ - 60^\circ$ otklona pramca od smjera prividnog vjetra. U navedenom režimu plovidbe, jedra funkcioniraju na principu hidrodinamičkog profila (kao i avionsko krilo). Stoga najbitnije je pravilno podesiti jedra (oblikovati profil s najboljom učinkovitošću za trenutne uvjete) kako bi se postigao najveći mogući poriv, a hidrodinamički otpor (posebno uslijed naginjanja broda) sveo na minimum. Prilikom jedrenja u vjetar jedrilica je bočno nagnuta (najčešće do 20°), a prilikom plovidbe u takvom položaju valovi i gibanje jedrilice značajno utječu na oblik jedara.

Slika 1. prikazuje spreg hidrodinamičkih i aerodinamičkih sila koje djeluju na jedrilicu koja se giba prema naprijed, u vjetar. Ukupna aerodinamička sila F_T , koja djeluje približno u geometrijskom težištu plana jedara, rastavljena je na silu poriva F_R (u smjeru kursa plovidbe) i silu naginjanja F_H (okomito na kurs broda). Da bi jedrilica bila u ravnoteži, ukupna hidrodinamička sila otpora R_T mora ležati na paralelnom pravcu, po iznosu biti jednaka ukupnoj aerodinamičkoj sili jedara, ali suprotne orijentacije. Također, hidrodinamičku silu otpora

možemo rastaviti na bočnu silu F_S i silu otpora R_T , koje se po smjeru djelovanja i iznosu suprotstavljaju komponentama ukupne aerodinamičke sile, tj. suprotne su orijentacije.



Slika 1. Spreg hidro-dinamičkih i aerodinamičkih sila [3]

Povećanjem ili smanjenjem brzine vjetra, dolazi do promjene aerodinamičke sile koja uzrokuje ubrzavanje ili usporavanje jedrilice do ponovnog uspostavljanja neke nove konstantne brzine, odnosno do ponovnog uspostavljanja ravnoteže sila.

Također, bitna značajka jedrilice je da nikada ne plove po liniji pramca. Pravac kretanja jedrilice otklonjen je za određeni kut zanošenja λ_z (Slika 1).

Međutim, budući da je za poriv jedrilice potreban vjetar, a vjetar najčešće uzrokuje i vjetrovne valove, hidro-aerodinamička slika značajno se mijenja. Zbog međudjelovanja valova i trupa broda dolazi do gibanja trupa broda na valovima, a posljedično i gibanja jedara te promjene aerodinamičke slike oko jedara. S obzirom da je navedena pojava vremenski promjenjiva takav problem potrebno bi bilo razmatrati u vremenskoj domeni i u izuzetno finim vremenskim razmacima. U današnje vrijeme postoje numeričke metoda koje su u mogućnosti s priličnom točnošću simulirati navedene pojave. Međutim zbog složenosti teorijske pozadine, i još uvijek ograničenosti računalnih resursa, ove metode ne koriste se u inženjerskoj praksi.

Umjesto navedenih, problem se najčešće razdvaja u više manjih segmenata koji se promatraju samostalno, a nesimulirani procesi modeliraju se postavljanjem rubnih uvjeta. Jedan od segmenata navedenog problema, razmatra se u nastavku ovoga rada.

1.2. Pregled literature

Interes za proučavanjem problema pomorstvenosti jedrilica javio se tijekom jednog popodnevnog jedrenja. Uspoređujući dva broda jednake duljine koja su jedrila u vjetar u uvjetima umjerenog vjetra i vala visine otprilike jedan metra, dovoljno udaljeni da se međusobni utjecaji mogu zanemariti, moglo se uočiti da jedan od brodova značajno bolje podnosi valove u pramac od onog drugog. Ne samo da je „ljepše klizio“ kroz valove, već je taj brod prilično bolje koristio i vjetar. Naime, na sporijem brodu, uslijed njihanja na valovima, dolazilo je do „ispuhavanja“ jedara, što je na momente značajno smanjivalo silu u jedrima i brzinu broda.

Prva na brodu dostupna literatura bila je knjiga *Biti brži*, autora Stjepana Vitaljća [3]. Osim teorijom trimanja jedara, Vitaljić u svojoj knjizi daje i pregled osnovnih teorijskih principa na kojima počiva ponašanje jedrilice u različitim vremenskim uvjetima. Ukratko opisuje ovisnost ponašanja jedrilice na valovima o osnovnim koeficijentima forme trupa, no bez ikakvih detaljnijih objašnjenja.

Larsson i Eliason [4], u svojoj knjizi poznatoj i prihvaćenoj među svim projektantima jahti dotiče se problema pomorstvenosti jedrilica, međutim više sa stajališta sigurnosti. U sklopu proračuna stabiliziteta definira *STIX* koeficijent koji nam govori o sigurnosti od prevrtanja i na temelju njega brod dobiva kategoriju plovidbe. Osim kratkog objašnjenja pojma polumjera momenta inercije, njegovog utjecaja na ponašanje broda na valovima i postupka njegove procjene u preliminarnoj fazi, autor daje definiciju dodatnog otpora valova i njegovog utjecaj na ukupni otpor jedrilice, međutim za detaljnije proučavanje problema pomorstvenosti preporučuje publikacije sveučilišta *Delft University of Technology*.

Fossati [2] daje detaljan pregled hidrodinamičkih i aerodinamičkih principa i zakona. Na temeljit, ali jednostavan način matematičkim formulama opisuje općenitu teoriju broda, primjenjujući je na jedrilice. Ova knjiga pokazala se kao izvrsna teorijska podloga za razumijevanje stručnih članaka na temu hidrodinamike jedrilice.

Na već spomenutom sveučilištu Delft, u sklopu znanstvenog projekta, sastavljena je internet baza rezultata modelskih ispitivanja trupova jedrilica iz sistematske serije *Delft Systematic Yacht Hull Series*. Sva ispitivanja i rezultati popraćeni su objavljenim znanstvenim člancima koji opisuju ispitivanja, a autori projekta u znanstvene svrhe voljni su zainteresiranima ustupiti i modele ispitivanih formi. Baza podataka popraćena je i priručnikom naziva *User*

Manual for the Delft Systematic Yacht Hull Series Database website [5] koji daje detaljan opis svih provedenih mjerenja.

Keuning *et al.* [6] opisuju približnu metodu procjene dodatnog otpora valova jedrilice. Metoda je temeljena na višegodišnjem ispitivanju sistematske serije trupova jedrilica u bazenu. Formulirana je kao regresijski polinom čiji članovi su značajke forme trupa jedrilice. Metoda je fleksibilna s obzirom na kut nailaska vala, brzinu broda i polumjer tromosti mase jedrilice. Razvijena je za potrebe programa za predviđanja brzine jedrilice (*Velocity Prediction Program*). Osim za uobičajene iznose brzina jedrilica, čime se bavi Oossanen [10], Keuning [11] izlaže i metodu za procjenu ukupnog otpora golog trupa jedrilice pri većim brzinama.

Godine 2007., Gaillarde *et al.* [7] objavili su članak koji opisuje različite metode proučavanja pomorstvenih karakteristika jedrilica. U članku su opisane eksperimentalne i numeričke metode, te su dana predviđanja o daljnjem razvoju numeričkih simulacija.

Bordogna [8], u svojem magistarskom radu opisuje eksperimente provedene na sveučilištu u Delftu kojima je cilj bio proučiti dinamičke utjecaje valova na pomorstvene karakteristike jedrilica. Eksperimenti su provedeni po uzoru na prethodno provedeno istraživanje koje je 1995. godine proveo Levandou [9], uz razliku uvođenja momenta trima koji simulira utjecaj jedara. Eksperimentalne rezultate usporedio je sa numeričkim rezultatima temeljenima na „strip metodi“ i potencijalnom strujanju.

1.3. Definiranje problema i postavljanje cilja

Na temelju proučene literature, alata dostupnih na Fakultetu te znanja stečenog tijekom studija te u dogovoru s mentorom, odlučeno je da će se u ovom diplomskom radu obraditi tema pomorstvenosti jedrilice. Na temelju dostupnih podataka iz već objavljenih radova i rezultata provedenih eksperimenata, izvršit će se numerička simulacija ponašanja dviju formi jedrilica iz sistematske serije *Delft Systematic Yacht Hull Series* na valovima za dva značajna stupnja slobode gibanja (poniranje i posrtanje). Istražit će se:

1. Utjecaj bočnog nagiba na gibanje jedrilice
2. Utjecaj bočnog nagiba na dodatni otpor uslijed valova

Dobiveni rezultati sistematično će se prikazati i usporediti sa eksperimentalnim rezultatima dostupnima u ranije objavljenim radovima. Prilikom numeričke analize koristiti će

se program *HydroSTAR* (*Bureau Veritas*) [12] koji *metodom rubnih elemenata* primjenjuje teoriju potencijalnog strujanja.

2. ODABIR FORME I EKPERIMENTALNI REZULTATI

Iako jedro kao sredstvo propulzije postoji od davnih dana i smatra se jednim od prvih oblika propulzije, a razni oblici jedrilica i jedrenjaka plove svjetskim morima već stoljećima, tek nedavno krenulo se u sustavno istraživanje aero-hidrodinamičkih svojstava jedrilica. Do prije tridesetak godina poslom projektiranja i predviđanja aero-hidrodinamičkih značajki jedrilica bavili su se većinom iskusni jedriličari i pomorci. Iako često s vrlo skromnim ili gotov nikakvim teorijskim i inženjerskim znanjima o projektiranju brodova, a zahvaljujući svojem ogromnom iskustvu plovidbe na raznim brodovima, njihovi projekti obavljali su svoju funkciju, međutim bili su daleko od optimalnih. Razvojem jedriličarskih natjecanja (*America's Cup*, *Volvo Ocean Race*...) pojavila se potreba za razvojem inženjerskih metoda i matematičkih modela s ciljem postizanja optimalnih svojstava brodova.

Prvi korak bio je bazensko ispitivanje modela. Na sveučilištu *Delft University of Technology* započelo je razvijanje serije trupova jedrilica pod nazivom *Delft Systematic Yacht Hull Series* i njihovo sustavno ispitivanje u bazenima. Serija trupova razvila se variranjem glavnih značajki trupova broda, a kao polazni modeli odabrani su značajni trupovi za pojedina razdoblja, od klasičnih formi, sve do modernih natjecateljskih jedrilica. Današnja serija trupova broji šezdesetak primjeraka, a njihov broj stalno se povećava. Na trupovima vrše se ispitivanja utjecaja pojedinih fizičkih značajki modela (utjecaj duljine, širine, gaza ...) te utjecaja bočnog nagiba i trima na sveukupni otpor broda, pojavu bočne sile, te pomorstvene karakteristike trupa. Trupovi se u bazenu ispituju sa i bez privjesaka (goli trup, trup sa kormilom i kobilicom). Razvojem računala, provedena eksperimentalna istraživanja služe kao odlična referenca u istraživanju i razvoju te korištenju numeričkih metoda koje bi jednog dana mogle zamijeniti bazenska ispitivanja barem u nekoj početnoj fazi projekta.

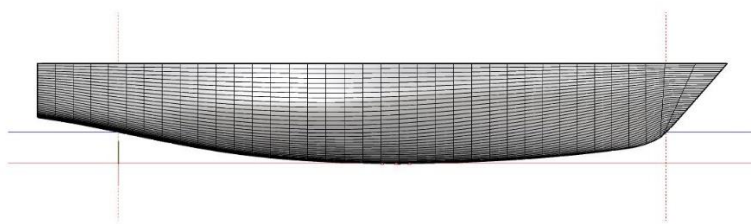
2.1. Odabir forme trupa jedrilice

Prilikom istraživanja objavljene literature koja se bavi problemom hidrodinamike i pomorstvenošću jedrilica, pokazalo se da u posljednje vrijeme postoji mnogo pokušaja primjene numeričkih metoda prilikom određivanja hidrodinamičkih značajki trupa jedrilica. Međutim, većina pokušaja odnosila se na projekte u razvoju za koje ne postoji dokumentirana usporedba sa značajkama broda u naravi ili usporedba sa rezultatima bazenskih ispitivanja. Svi radovi koji su bili potkrijepljeni eksperimentanim rezultatima odnosili su se na *Delft Systematic Yacht Hull Series* seriju trupova. Stoga, logičan odabir bio je uzeti neki od trupova iz spomenute serije kako bi rezultati dobiveni numeričkom analizom mogli biti uspoređeni i potvrđeni pouzdanim rezultatima dobivenim eksperimentom.

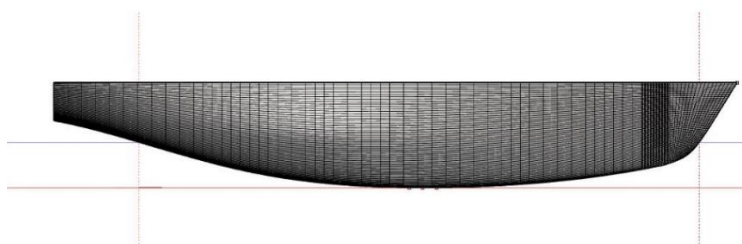
Odabrani su modeli #43 i #45 pod nazivom *Sysser 43* i *Sysser 45* iz četvrte serije. Oba modela nastala su modificiranjem fizikalnih značajki *Modela 2556*, projekta poznate projektantske kuće *Sparkman & Stephens*, a navedeni brod projektiran je prema pravilima ORC-a (*Offshore Racing Congress Rules* – pravila za gradnju brodova namjenjenih sudjelovanju na regatama) [14]. Brod spada u skupinu *racer/cruiser*, a građen je u aluminiju.

Modeli za bazenska ispitivanja građeni su od stakloplastičnih kompozita, a eksperimenti na njima provedeni su u dva navrata, 1995. godine i 2013. godine.

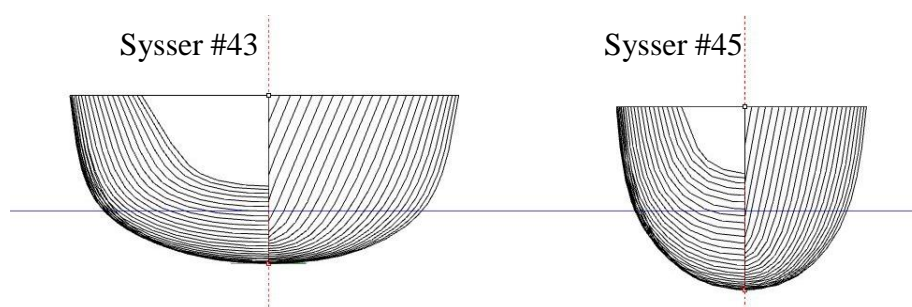
Slika 2., Slika 3. i Slika 4. prikazuju korištene forme.



Slika 2. *Sysser 43* – bočni pogled



Slika 3. *Sysser 45* – bočni pogled



Slika 4. Nacrt rebara formi Sysser 43 i Sysser 45

Osnovne hidrostatske značajke navedenih formi u uspravnom položaju prikazuje Tablica 1.

Tablica 1. Osnovne hidrostatske značajke formi Sysser 43 i Sysser 45

Naziv veličine	Oznaka	Mjerna jedinica	Sysser 43	Sysser 45
Duljina među okomicama	L_{WL}	m	1.71	1.71
Širina na vodnoj liniji	B_{WL}	m	0.614	0.409
Gaz golog trupa	T_C	m	0.097	0.146
Istisnina trupa	Δ	m^3	40.53	40.53
Površina vodne linije	A_W	m^2	0.705	0.467
Površina glavnog rebra	A_x	m^2	0.042	0.042
Oplakana površina trupa	S_C	m^2	0.774	0.642

Na pomorstvene karakteristike, odnosno na odziv broda na valovima, značajnu ulogu imaju širina broda i njegov gaz. Budući da duljina i gaz relativno utječu na ponašanje broda, najbolji uvid u njihov utjecaj pri ponašanju broda na valovima vidimo ukoliko ih svedemo na neku mjeru. U ovome slučaju širina je svedena na duljinu broda te gaz, u oblik bezdimenzijskih koeficijenata. Na taj način jasno možemo uočiti da se navede karakteristike značajno razlikuju kod formi #43 i #45 (Tablica 2.). Upravo navedena činjenica jedan je od glavnih razloga izbora tih dvaju trupova u razmatranje.

Tablica 2. Značajni bezdimenzijski koeficijenti formi #43 i #45

MODEL	$\frac{B_{WL}}{L_{WL}}$	$\frac{B_{WL}}{T_C}$
#43	0.359	6.290
#45	0.240	2.790

Drugi razlog odabira navedenih formi je dostupnost eksperimentalnih podataka za navede forme u prethodno objavljenim radovima.

2.2. Postavljanje i opis eksperimenata

Eksperimenti dostupni u literaturi provedeni su u bazenu *Delft Ship Hydromechanics Laboratory* [8] [9]. Bazen u kojem su provedeni pokusi dugačak je 142 m, širok 4.22 m, i dubok 2.5 m. Bazen je opremljen kolicima pogonjenim elektromotorom koja mogu postići maksimalnu brzinu od 8 m/s. U sklopu bazena nalazi se i generator valova koji može simulirati pravilne i nepravilne valove različitih valnih duljina i amplituda.

Istraživanja provedena u dostupnoj literaturi obuhvaćaju više eksperimenata, međutim za potrebe ovog rada, koristiti će se samo rezultati koji obuhvaćaju utjecaj nagiba broda na poniranje i posrtanje broda na valovima, te utjecaj nagiba broda na dodani otpor valova.

Promatrana su dva slučaja:

1. Uspravan brod, sa slobodnim poniranjem i posrtanjem, a spriječen u svim drugim stupnjevima slobode gibanja
2. Poprečni nagib od 20°, sa slobodnim poniranjem i posretanjem, a spriječen u svim drugim stupnjevima slobode gibanja

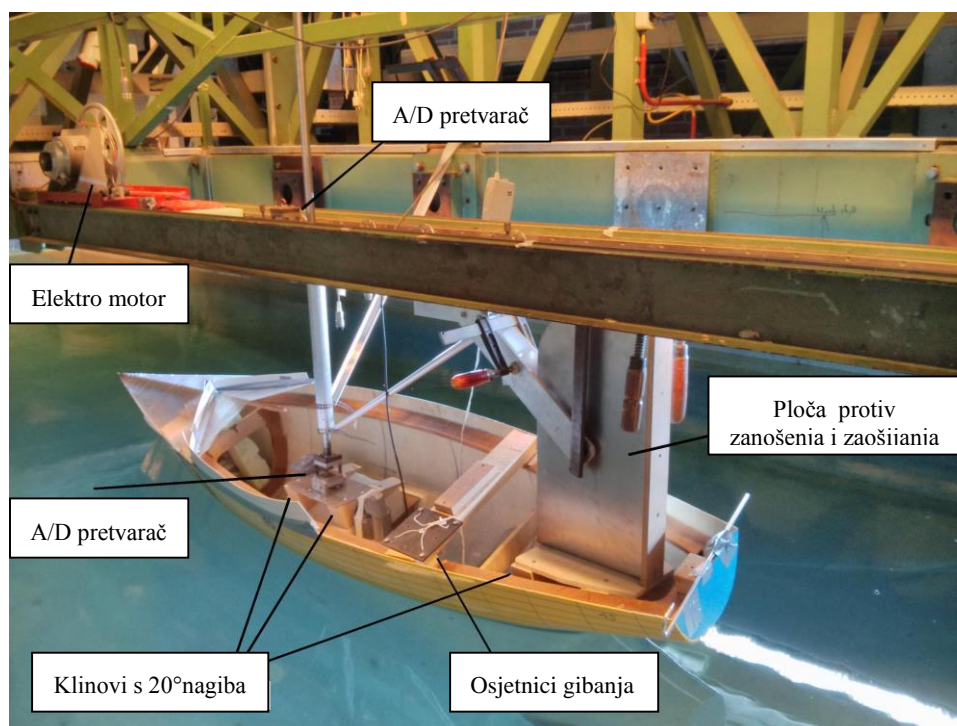
Za svaki od slučajeva mjerene su amplitude poniranja i posrtanja.

Sva mjerenja u bazenu provedena su bez privjesaka (kormila i kobilice) te bez kuta zanošenja koji je u stvarnosti posljedica djelovanja jedara.

U oba slučaja (i za oba modela) centar mase definiran je na sljedeći način:

- x-koordinata centra mase ima istu vrijednost kao i x-koordinata težišta istisnine : $x_G = x_B$
- y-koordinata iznosi nula: $y = 0$; tj. težište leži na uzdužnoj simetrali broda
- z-koordinata iznosi $z = 0.03$ m; tj. po visini težište je smješteno 3 cm iznad vodne linije (dogovor usvojen radi tehničkih zahtjeva pokusa)

Pomaci broda tijekom pokusa zabilježeni su trima kamerama pričvršćenim na kolica i četrima sondama montiranim na krmu modela. S ciljem sprječavanja zanošenja i zaošijanja, krmeni dio broda učvršćen je za kolica preko okomite metalne ploče. Dodavanjem klinova, ploča je također osiguravala stalan nagib broda od 20° prilikom ispitivanja broda u nagnutom stanju.



Slika 5. Prikaz postavljenog eksperimenta [8]

Poticanje turbulencije oko trupa broda postiglo se dodavanjem silicij-karbidnih granulastih traka širine 4cm na šestom, osmom i desetom teoretskom rebru.

Potrebna istisnina postigla se dodavanjem utega u trup broda. Prilikom postavljanja utega vodilo se računa da ukupno težište i uzdužni moment inercije ostanu nepromijenjeni. Iako su uzdužni momenti za oba broda predviđeni u iznosu $k_{yy}/L_{WL} = 0.25$; zbog tehničkih razloga navedeni moment je usvojen samo za model Sysser #45, dok je uzdužni moment inercije modela

Sysser #43 modeliran na najbližu fizički izvedivu vrijednost $k_{yy}/L_{WL} = 0.28$ [8]. U nagnutom stanju, utezi su pomicali u poprečnim ravninama, dok su njihove uzdužne koordinate ostale nepromjenjene. Posljedično, došlo je do male promjene vertikalne koordinate težišta, međutim prema tvrdnji proveditelja pokusa, utjecaj je bio zanemariv.

Izražena i lako uočljiva posljedica djelovanja jedara na ponašanje broda je poprečni nagib. Međutim zbog činjenice da je težište plana jedara visoko i pomaknuto prema pramcu u odnosu na svukupno težište broda, a hvatište sile otpora ispod ukupnog težišta i pomaknuto prema krmi; javlja se moment trima koji „uzdužno zakreće brod“. Kako bi se čim vjernije opisalo navedeno stanje, ovisno o brzini broda i formi trupa, modelu je narinut trim. Pregled kuteva trima koji su narinuti prilikom provođenja eksperimentalnih ispitivanja, ali koji su modelirani i u numeričkoj simulaciji prikazuje Tablica 3.

Tablica 3. Kutevi trima korišteni u eksperimentu i simulaciji

Model	Kut trima [°]	
	$Fn = 0.325$	$Fn = 0.4$
Sysser #43	0.12	0.55
Sysser #45	0.23	1.02

Pokusi su provedeni sa pet valnih duljina λ (2m, 2.25m, 2.5m, 3m i 3.5m) te sa valnom amplitudom $\zeta_a = 25$ mm. Frekvencija uzbudnog djelovanja generatora valova određena je na temelju disperzivne jednadžbe (1) [8], uzimajući u obzir ograničenu dubinu bazena od 2.5 m.

$$\omega^2 = kg \tanh kd \quad (1)$$

3. TEORIJA POTENCIJALNOG STRUJANJA I GIBANJE BRODA NA VALOVIMA

3.1. Teorija potencijalnog strujanja

Potencijalno strujanje je neviskozno, nestlačivo i homogeno. Zahvaljujući pretpostavci da u fluidu nema kavitacijskih mjehurića plina, u takvom strujanju vrijede pojednostavljeni zakoni mehanike fluida.

Prilikom korištenja teorije potencijalnog strujanja u opisivanju značajki valova, treba se držati pretpostavke o maloj valnoj strmini (tada, zbog male vrijednosti njenog kvadrata u jednadžbama koje opisuju val, taj član može se zanemariti). U linearnoj teoriji harmonijski promjenjivi pomaci, brzine i ubrzanja čestica fluida, te harmonijski promjenjive vrijednosti tlaka u linearnom su odnosu prema elevaciji valne površine.

Osnovni uvjet potencijalnog strujanja izražen je jednadžbom:

$$\text{rot } \mathbf{v} = \nabla \times \mathbf{v} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{v}(x, y, z; t) = \text{grad } \Phi(x, y, z; t) = \nabla \Phi(x, y, z; t) \quad (3)$$

Gdje je \mathbf{v} vektor brzine strujanja fluida određen prostornim koordinatama x, y i z u vremenu t .

Potencijal brzine strujanja $\Phi(x, y, z; t)$ skalarna je funkcija koja ima svojstvo da je komponenta brzine u točki fluida u bilo kojem trenutku zapravo njezina derivacija u tom smjeru za odabranu točku. Funkcija potencijala brzine strujanja apstraktna je matematička funkcija bez stvarnog fizikalnog značenja. Iako je njena vrijednost određena u svakoj točki idealne tekućine, vrijednost potencijala brzine nije moguće direktno mjeriti. [1]

Izraz za potencijal brzine strujanja u valu harmonijska je funkcija. Potencijal brzine strujanja harmonijskog vala Φ_w mora zadovoljavati četiri rubna uvjeta:

1. Uvjet kontinuiteta, odnosno Laplaceovu jednadžbu u području fluida – uvjet homogenosti i nestlačivosti fluida

$$\nabla v = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

odnosno uvrštenjem komponenti:

$$\nabla^2 \Phi = \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial z^2} = 0 \quad (5)$$

2. Rubni uvjet nepromočivosti na dnu - vertikalna komponenta brzine strujanja čestice fluida na dnu jednaka je nuli.

$$w = v_z = \frac{\partial \Phi_w}{\partial z} = 0 \quad , za z = -d \quad (6)$$

3. Dinamički rubni uvjet na slobodnoj površini - tlak p na slobodnoj površini jednak atmosferskom ili drugačije narinutom. Tlak unutar nestacionarnog bezvrtložnog strujanja određuje se Bernoullijevom jednadžbom (7) koju, osim člana vanjskog tlaka (gdje je ρ gustoća fluida), u općem obliku čine hidrostaticki član gz i preostali hidrodinamički član:

$$\frac{\partial \Phi_w}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Phi_w}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{p}{\rho} + gz = C^* \quad (7)$$

4. Kinematički rubni uvjet na slobodnoj površini - vertikalna brzina čestice fluida na slobodnoj površini jednaka vertikalnoj brzini slobodne površine, a proizlazi iz (8) gdje ζ predstavlja elevaciju slobodne površine:

$$\frac{D\zeta}{Dt} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \zeta}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

Parcijalnim deriviranjem kombinacije dinamičkog i kinematičkog runog uvjeta dobije se kinematičko-dinamički rubni uvjet ili Cauchy-Poissonov uvjet.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial^2 \Phi_w}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

Harmonijski ravninski valovi

Harmonijski ravninski valovi periodično je ponavljanje valnih obilježja u vremenu i prostoru. Ako je oblik valnog gibanja jednak u ravninama paralelnih presjeka, valovi se nazivaju ravninskima. [1]

S obzirom da ima oblik kosinusne funkcije, nazivamo ga harmonijskim, a njegov profil u potpunosti definiran je dvjema od triju navedenih karakterističnim fizikalnim veličinama:

- Duljinom vala – λ [m]
- Visinom vala – H [m]; $H = 2 \zeta_a$ (ζ_a – valna amplituda)
- Valnim periodom – T [s]

Treća veličina može se izračunati iz disperzivne jednadžbe (1).

Još neki fizikalni izrazi izvedeni iz karakterističnih fizikalnih veličina opisuju zakonitosti harmonijskih ravninskih valova:

$$\text{Valni broj [rad/m]} \quad k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (10)$$

$$\text{Kružna valna frekvencija [rad/s]} \quad \omega = \frac{2\pi}{T} \quad (11)$$

$$\text{Fazna brzina [m/s]} \quad c = \frac{\lambda}{T} = \frac{\frac{2\pi}{k}}{\frac{2\pi}{\omega}} = \frac{\omega}{k} \quad (12)$$

$$\text{Valna strmina [m/m]} \quad \alpha = \frac{H}{\lambda} \quad (13)$$

Utjecaj viskoznosti na proces nastanka vala i valno gibanje općenito je malen. Stoga, naveći dio valne teorije razvija se uz pretpostavku neviskoznog fluida i potencijalnog gibanja. [1].

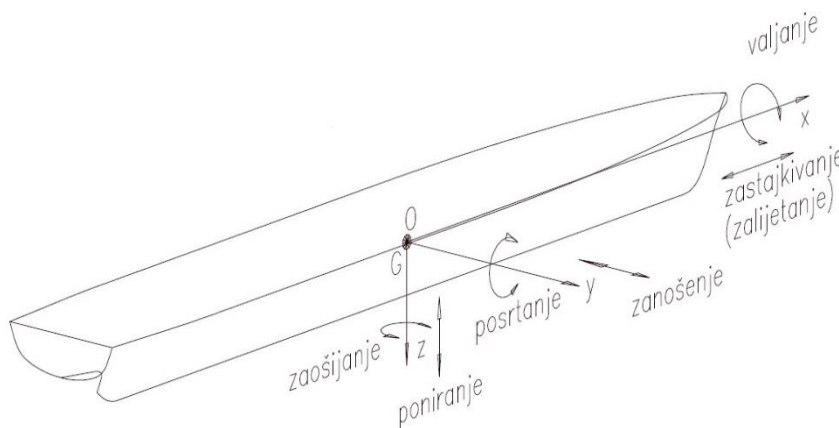
3.2. Gibanje broda na valovima

Značajna pretpostavka koju uzimamo u obzir prilikom razmatranja njihanja broda na valovima jest da se brod ponaša kao kruto tijelo, odnosno zanemarujemo utjecaj elastičnih pomaka trupa na njihanje broda. Primjenjujući navedenu pretpostavku, možemo tvrditi da su dinamika tijela i fluida koji ga okružuje direktna posljedica njihova međudjelovanja.

Rezultirajuće njihanje broda sastoji se od sljedećih šest gibanja podjeljenih u dvije grupe:

1. Translacijska gibanja:
 - a. zalijetanje (u smjeru osi x) – η_1
 - b. zanošenje (u smjeru osi y) – η_2
 - c. poniranje (u smjeru osi z) – η_3
2. Rotacijska gibanja:
 - d. valjanje (oko osi x) – η_4
 - e. posrtanje (oko osi y) – η_5
 - f. zaošijanje (oko osi z) – η_6

Slika 6. prikazuje 6 stupnjeva slobode gibanja broda .



Slika 6. Stupnjevi slobode gibanja broda na valovima [1]

Prilikom opisivanja pojave međudjelovanja broda i fluida te njihovog gibanja, a s ciljem sistematičnog i svima razumljivog pristupa rješavanju problema, uobičajeno je držati se nekih dogovora. Kao osnovu svega, potrebno je jasno definirati koordinatne sustave.

Nepomični koordinatni sustav (fiksni, inercijski) $S (x_0, y_0, z_0)$ vezan je za Zemlju. Ravnina x_0y_0 leži na mirnoj slobodnoj površini, pozitivan smjer osi x_0 je u smjeru napredovanja vala, a može biti i zakrenut u smjeru napredovanja broda. Os z_0 usmjerena je vertikalno prema gore.

Koordinatni sustav broda $G (x_b, y_b, z_b)$ vezan je za brod, a ishodište mu je u težištu broda G . Os x_b leži u smjeru uzdužne simetrale broda, a usmjerena je prema pramcu broda. Os y_b usmjerena je prema lijevom boku broda, a os z_b usmjerena je vertikalno prema gore. U stanju mirovanja broda ravnina x_by_b paralelna je s mirnom slobodnom površinom.

Translatirajući koordinatni sustav $O (x, y, z)$ kreće se brzinom broda U . Ako brod miruje smjerovi osi jednaki su onima koordinatnog sustava $G (x_b, y_b, z_b)$.

Zahvaljujući linearnoj prirodi modela, problem njihanja broda u linearnoj teoriji može se prikazati preko dva neovisna modela:

1. Model djelovanja vala na nepomično tijelo

Strujanje oko nepomičnog tijela koje nastaje uslijed nailazećeg vala opisano je dvjema funkcijama:

- Funkcijom potencijala brzine strujanja nailaznog vala - Φ_0
- Funkcijom potencijala brzine strujanja njegove difrakcije - Φ_7

$$\Phi(x, y, z; t) = \Phi_0(x, y, z; t) + \Phi_7(x, y, z; t) \quad (14)$$

Osim pretpostavki i uvjeta usvojenih kod definiranja potencijala brzine strujanja harmonijskog vala, strujanje u difrakcijskoj komponenti mora zadovoljiti i rubni uvjet:

- Nepromočivosti oplakane površine S

$$v_n = \mathbf{n} \text{ grad } \Phi = \frac{\partial}{\partial n} (\Phi_0 + \Phi_7) = 0 \quad , \text{ na } S \quad (15)$$

U jednadžbi (15) v_n brzina je strujanja u smjeru normale na površinu S , a \mathbf{n} vektor normale.

Zadovoljenjem svih uvjeta, te integracijom tlakova po oplakanoj površini S uronjenog dijela volumena trupa nalazi se vektor rezultirajuće uzbudne sila (16) i vektor rezultirajućeg uzbudnog momenta (17) kojima nailazeći val djeluje na tijelo:

$$\mathbf{F}_U = Re \left\{ i\omega\rho\zeta_a \iint_{S_0} (\Phi_0(x, y, z) + \Phi_7(x, y, z)) \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (16)$$

$$\mathbf{M}_U = Re \left\{ i\omega\rho\zeta_a \iint_{S_0} (\Phi_0(x, y, z) + \Phi_7(x, y, z)) \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (17)$$

Pri tome, tlak p može se izraziti pomoću funkcije potencijala brzine strujanja koristeći linearizirani dio Bernoullieve jednadžbe za hidrodinamički tlak u potencijalnom strujanju (18):

$$p = -\rho \frac{\partial}{\partial t} \Phi(x, y, z; t) + \rho g z \quad (18)$$

2. Model njihanja tijela na mirnoj tekućini

Strujanje oko tijela opisano je potencijalom brzine strujanja Φ_j u nastalim valovima radijacije ζ_j ($j = 1...6$).

Uslijed nepromočivosti oplakane površine S uronjenog dijela tijela potrebno je uvesti dodatni rubni uvjet za brzinu strujanja u valu radijacije. Budući da ne postoji strujanje kroz oplakanu površinu, normalna komponenta brzine čestice tekućine uz stijenku mora biti jednaka normalnoj komponenti brzine dodirne točke $P(x_P, y_P, z_P)$ na oplakanoj površini S . Uvjet nepromočivosti za kompleksni potencijal radijacije dan je izrazom:

$$\mathbf{n} \text{ grad } \Phi_j = \frac{\partial \Phi_j}{\partial n} = v_{n_j}^P, \quad j = 1...6 \quad (19)$$

U slučaju prisilnog njihanja tijela na mironj tekućini, ukupni potencijal određen je sljedećom superpozicijom:

$$\Phi(x, y, z; t) = \sum_{j=1}^6 \Phi_j(x, y, z; t) \quad (20)$$

Hidrostatske sile (21) i momenti (22) vraćaju tijelo u početno stanje pa se nazivaju povratnim silama odnosno momentima.

$$\mathbf{F}_C = -\rho g \operatorname{Re} \left\{ \iint_{S_0} [q_0(x, y)] \{\eta_j\} \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (21)$$

$$\mathbf{M}_C = -\rho g \operatorname{Re} \left\{ \iint_{S_0} [q_0(x, y)] \{\eta_j\} \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (22)$$

Tijekom njihanja na mirnoj tekućini tijelo emitira valove radijacije koji iz sustava odnose energiju i na taj način smanjuju amplitude njihanja. Sile (23) i momenti (24) koje tom prilikom nastaju manifestiraju se kao hidrodinamička reakcija:

$$\mathbf{F}_H = \operatorname{Re} \left\{ i\omega \rho \sum_{j=1}^6 \eta_j \iint_{S_0} \Phi_j(x, y, z) \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (23)$$

$$\mathbf{M}_H = \operatorname{Re} \left\{ i\omega \rho \sum_{j=1}^6 \eta_j \iint_{S_0} \Phi_j(x, y, z) \mathbf{r} \times \mathbf{n}_0 dS_0 e^{-i\omega t} \right\} \quad (24)$$

Jednadžbe dinamičke ravnoteže

Jednadžbe gibanja temelje se na drugom Newtonovu zakonu gibanja koji definira da su pri translaciji sile koje djeluju na tijelo jednake umnošku mase i ubrzanja, dok su za rotaciju momenti koji djeluju na tijelo jednaki su umnošku momenata tromosti i kutnog ubrzanja. Tijelo koje se njiše na valu u svakom je trenutku u stanju dinamičke ravnoteže. Hidrodinamičke i hidrostatske sile i momenti uravnoteženi su inercijskim silama i momentima mase tijela. [1]

Dinamička ravnoteža njihanja izražena je sustavom diferencijalnih jednadžbi koji izražava ravnotežu inercijskih, hidrodinamičkih i uzbudnih sila:

$$([M_{jk}] + [A_{jk}])\{\ddot{\eta}_j\} + [B_{jk}]\{\dot{\eta}_j\} + [C_{jk}]\{\eta_j\} = \zeta_a\{F_j(t)\} = \operatorname{Re}\{\zeta_a\{F_j\}e^{i\omega t}\} \quad (25)$$

Uz pretpostavku harmonijskog gibanja dinamička ravnoteža njihanja izražena je sljedećim sustavom algebarskih jednadžbi:

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}]) \{\delta_j\} e^{i\omega t} = \zeta_a \{F_j\} e^{i\omega t} \quad (26)$$

Prethodna jednakost mora biti zadovoljena u svakom trenutku pa se uvjet dinamičke ravnoteže svodi na sustav kompleksnih algebarskih jednadžbi s nepoznanicama δ_j , $j=1...6$

$$([C_{jk}] - \omega^2([M_{jk}] + [A_{jk}]) + i\omega[B_{jk}]) \{\delta_j\} = \zeta_a \{F_j\} \quad (27)$$

gdje je:

$[M_{jk}]$ - matrica mase tijela,

$[A_{jk}]$ -matrica pridruženih masa vode,

$[B_{jk}]$ matrica hidrodinamičkog prigušenja i

$[C_{jk}]$ matrica krutosti povratnih sila.

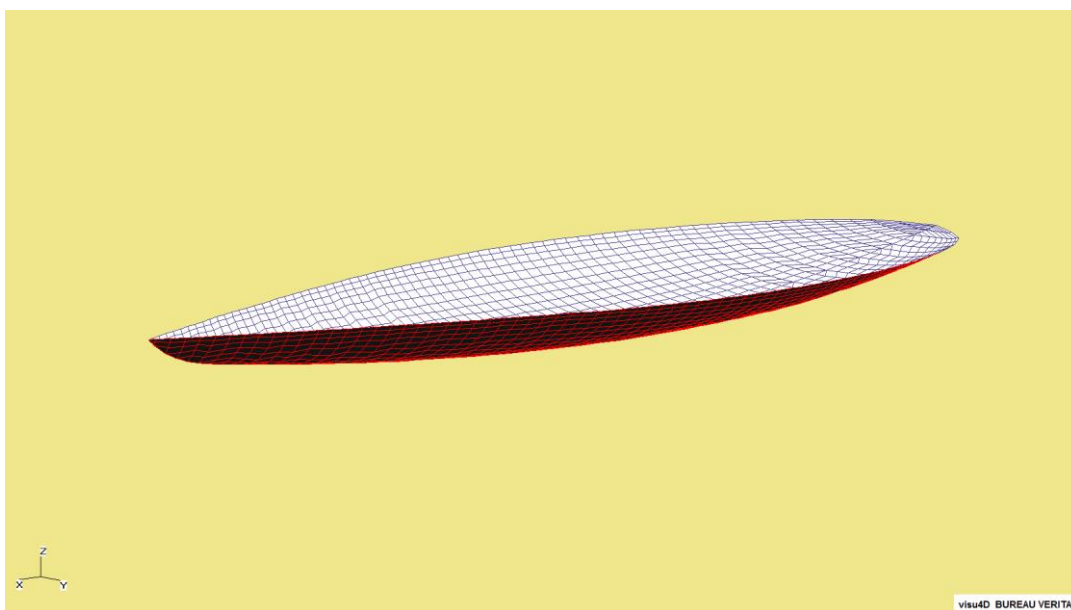
4. NUMERIČKO MODELIRANJE I OBRADA REZULTATA

4.1. Opis postupka modeliranja

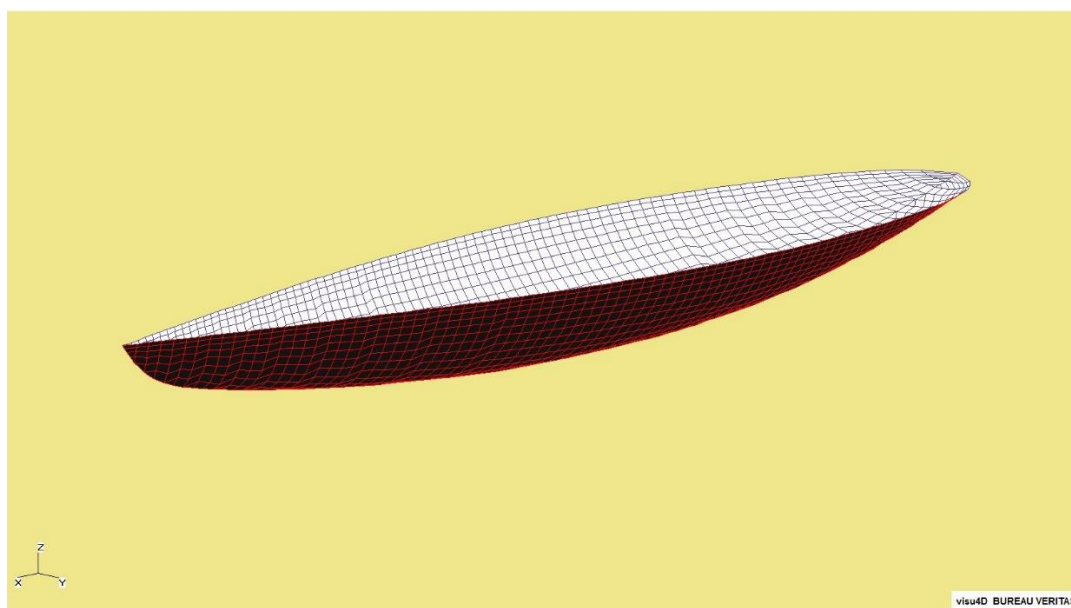
Numerički dio proračuna proveden je u programskom paketu *HydroSTAR* (Bureau Veritas) [12]. Navedeni programski paket u mogućnosti je, već spomenutom metodom rubnih elemenata i primjenom teorije potencijalnog strujanja, zakrivljenu brodsku površinu diskretizirati ravnim trokutastim i četverokutnim panelima koji čine mrežu panela (engl. *mesh*).

Sam program strukturno je podijeljen u nekoliko modula od kojih svaki, na temelju izlazne datoteke prethodnog modula, provodi dio proračuna. No prije samog početka proračuna potrebno je modelirati formu.

U ovome radu obje forme, početno definirane u obliku 3D modela, pretvorene su u skup od po 50 krivulja rebara zapisanih u obliku tekstualne datoteke. Tako strukturirana tekstualna datoteka, uz dodane pojedine karakteristične informacije o formi (svojstvene tipu forme), ulazni je podatak modulu *hsmsh* koji automatskim *mesherom* diskretizira brodsku formu na panele. Izlazna datoteka sadržava sve podatke o panelima i položaju broda u odnosu na slobodnu površinu vode. Budući da je zadatak modelirati ponašanje broda u uspravnom i nagnutom položaju (20° bočnog nagiba), ovo je ključni korak u kojem se to definira. Slika 7. prikazuje mrežu panela forme *Sysser #43* u uspravnom položaju, dok Slika 8. prikazuje isti položaj za formu *Sysser #45*. Iz navedenih slika jasno se vidi da je mreža dovoljno gusta, ujednačena i simetrična.

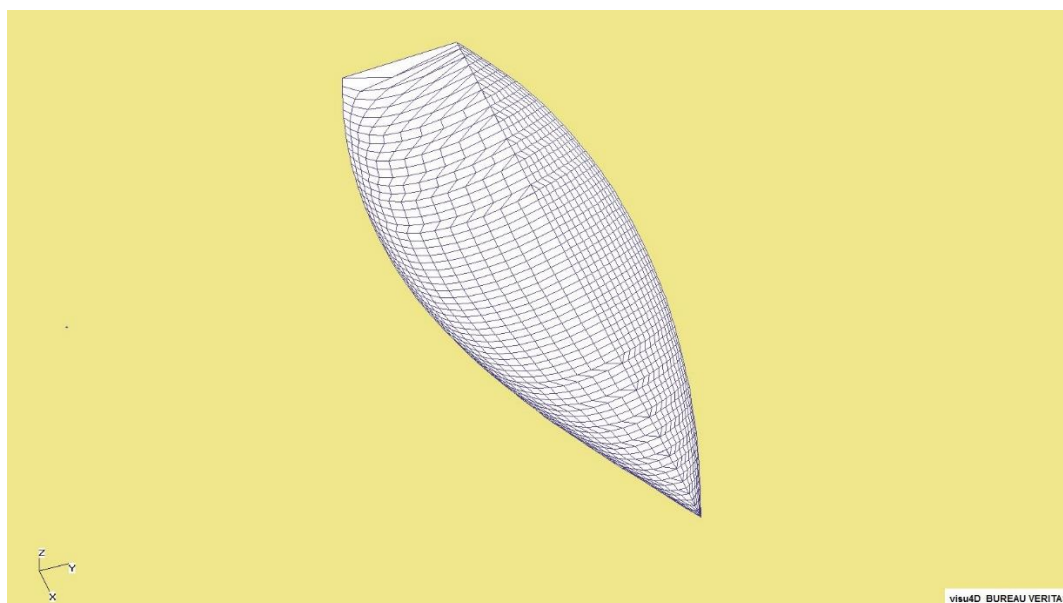


Slika 7. Diskretizacija forme #43 u uspravnom položaju mrežom panela

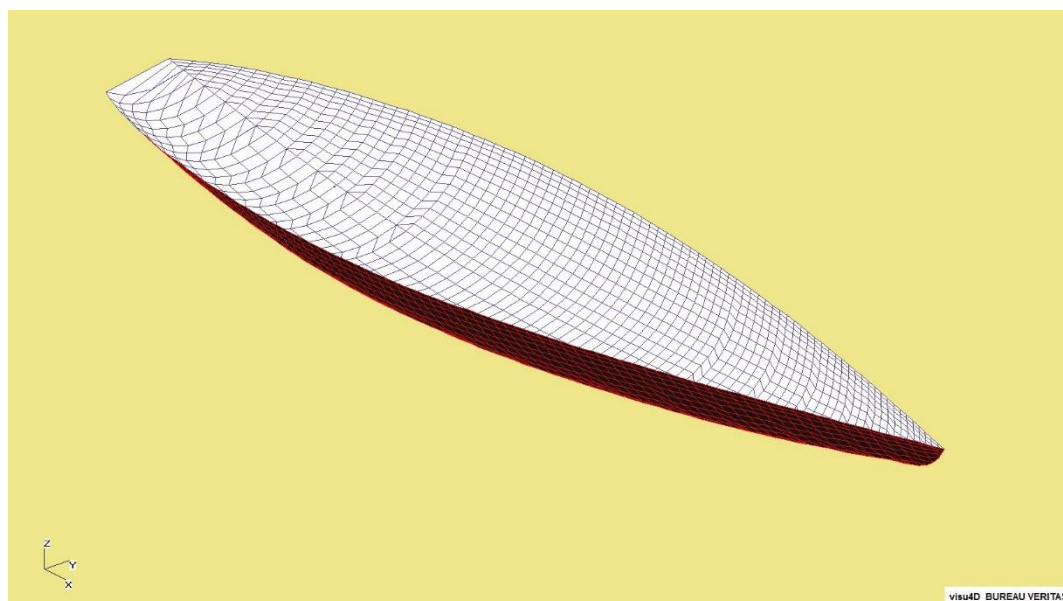


Slika 8. Diskretizacija forme #45 u uspravnom položaju mrežom panela

Programski paket *HydroSTAR* ima mogućnost modeliranja nesimetričnih brodskih formi. Iako jedrilica ima uzdužno simetričnu formu, prilikom nagibanja za veće kutove, a zbog velike zakrivljenosti forme, uronjeni dio trupa ima značajno izraženu nesimetričnost (Slika 9. i Slika 10.).



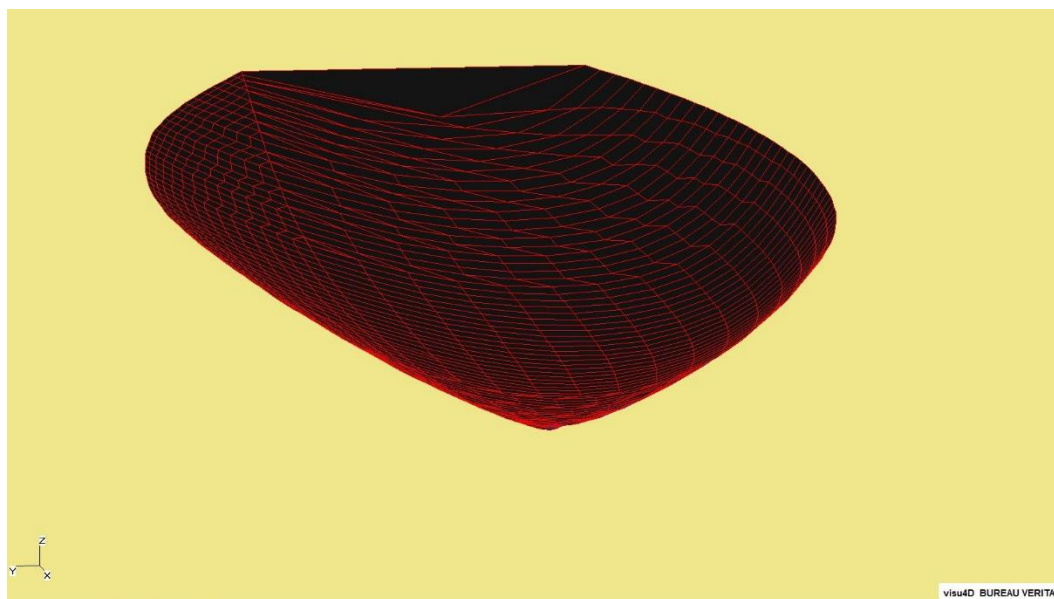
Slika 9. Diskretizacija forme #43 u nagnutom položaju mrežom panela



Slika 10. Diskretizacija forme #45 u nagnutom položaju mrežom panela

Program *HydroSTAR* prvenstveno je prilagođen formama velikih trgovačkih brodova. Iz Slika 7. - Slika 10. jasno je uočljivo da se mreža panela jednoliko raspoređuje po jednoj i drugoj polovici forme. Budući da je zakrivljenost forme jedrilice puno veća od zakrivljenosti forme trgovačkog broda, prilikom nagiba broda kod jedrilice će doći do značajnije promjene površine

na uronjenoj strani. U opisanom stanju, veću (uronjenu) površinu treba opisati sa jednakim brojem panela kao i onu stranu na kojoj imamo smanjenje površine zbog izrona dijela forme. Da bi izbjegao rupe u formi, navedenoj promjeni *HydroSTAR* se prilagođava povećanjem dimenzija panela na uronjenoj strani („zavjetrinskoj“), odnosno smanjenjem veličine panela na izronjenoj („privjetrinskoj“) strani. Iako je potencijalna teorija robustna, za očekivati je da će navedeni neujednačen raspored panela ujecati na konačni rezultat.



Slika 11. Neujednačen raspored panela na krmi forme Sysser #43

Forma *Sysser #43* plića je forma i kod nje neujednačenost rasporeda panela najizraženija je na krmi (Slika 11.), dok je kod dublje forme *Sysser #45* neujednačen raspored panela izraženiji na središnjem dijelu trupa broda. Koja od navedenih neujednačenosti značajnije utječe na rezultate pokazati će usporedba s eksperimentalnim podacima u zaključnom poglavlju ovoga rada.

Nakon konačnog definiranja mreže panela, modul *hsrdf* provodi proračun radijacijske i difrakcijske komponente strujanja. Na temelju prethodno definiranih ulaznih podataka o valovima (valnoj duljini ili valnoj frekvenciji) i prethodno generiranoj mreži panela, *HydroSTAR* će generirati matricu masa, matricu pridruženih masa, matricu hidrodinamičkog prigušenja te matricu krutosti povratnih sila koje će se koristiti u sljedećem modulu prilikom rješavanja dinamičkih jednadžbi gibanja.

Modul **hsmcn** koristeći podatke iz radijacijsko-difrakcijske analize rješava dinamičku jednadžbu gibanja za dozvoljene stupnjeve slobode. Kako bismo simulirali uvjete odgovarajuće onima u eksperimentu, u „nultom koraku“ potrebno je uočiti kakav odziv daje simulacija. Budući da je u ovom slučaju osim poniranja i posrtanja, značajan odziv bio i u obliku ljuljanja, taj stupanj slobode spriječen je uvođenjem velike vrijednosti u matricu krutosti na mjesto ljuljanja.

Dodatni otpor valova spada u sile drugoga reda. Za proračun sila drugoga reda *HydroSTAR* koristi modul **hsdft**. Na temelju radijacijsko-difrakcijske analize i jednadžbe dinamičke ravnoteže, modul proračunava dodatni otpor valova.

Zadnji modul **hsrao** sve proračunate vrijednosti zapisuje u obliku tekstualne datoteke.

Budući da programski paket *HydroSTAR* koristi teoriju potencijalnog strujanja, izlazne vrijednosti poniranja su u metrima i svedene su na jedinicu valne amplitude od jednog metra.

Odzivi za manje ili veće amplitude uzbudnog vala mogu se dobiti množenjem izlaznih rezultata s amplitudom uzbudnog vala.

4.2. Prikaz i obrada rezultata

U svrhu vrednovanja rezultata dobivenih numeričkom metodom, numerički rezultati uspoređeni su s dostupnim eksperimentalnim rezultatima koji se smatraju vjerodostojnima, a potvrđeni su i mjerenjima na brodovima u naravi. Osim navedenih eksperimentalnih rezultata, zanimljivim se učinilo usporediti rezultate dobivene programom *HydroSTAR* s dostupnim rezultatima dobivenim pomoću sličnog programa za numeričke simulacije pod nazivom *PDSTRIP* [13]. Također za navedenu seriju formi, za procjenu dodatnog otpora valova, postoje i formule dobivene regresijskom analizom eksperimentalnih rezultata. Katak opis metode te usporedba navedene metode s eksperimentalnom dani su u Prilogu 2 na kraju rada.

Tablica 4. Popis uspoređivanih metoda

Popis uspoređivanih metoda	Forma		Froudeovi brojevi		Nagib	
	#43	#45	Fn = 0.325	Fn = 0.4	0°	20°
Eksperimentalni rezultati	X	X	X	X	X	X
Numerički rezultati <i>HydroSTAR</i>	X	X	X	X	X	X
Numerički rezultati <i>PDSTRIP</i>	X	X	X	X	X	X
Regresijska analiza - DODATNI OTPOR VALOVA		X		X	X	X

Izlazni podaci iz programskog paketa *HydroSTAR* dani su u ovisnosti o valnoj frekvenciji. Uzmimanjem u obzir ograničenost dubine bazena, i uvrštavanjem valne frekvencije u disperzivnu jednadžbu (1), moguće je odrediti odgovarajuće valne duljine.

Zbog jednostavnosti i preglednosti prikaza mnoštva rezultata, odlučeno je rezultate sistematično prikazati u obliku dijagrama. Budući da su istraživane dvije forme trupa, za po dva nagiba i po dva iznosa Froudeovih brojeva, u ovisnosti o pet valnih duljina, te da je cilj bio usporediti više metoda, a u skladu s uobičajenom inženjerskom i znanstvenom praksom; rezultati su prikazani u bezdimenzijskim veličinama. Na osi apscisa omjer je duljine broda među okomicama i valne duljine; a na osi ordinata promatrana veličina (poniranje, posrtanje ili dodatni otpor valova) bezdimenzionirana sa karakterističnim značajkama broda i fluida (duljina broda među okomicama, gustoćom vode, gravitacijskim ubrzanjem ...). Tablica 5. prikazuje mjerne jedinice pojedinih fizikalnih veličina korištenih u bezdimenzionalizaciji.

Tablica 5. Prikaz mjernih veličina i jedinica korištenih u dijagramima

Naziv veličine	Oznaka	Mjerna jedinica
Valna amplituda	ζ_a	m
Valna duljina	λ	m
Gravitacijsko ubrzanje	g	m / s^2
Gustoća bazenske vode	ρ	kg / m^3
Duljina među okomicama	L_{WL}	m
Poniranje	η_3	m
Posrtanje	η_5	m
Dodatni otpor valova	R_{AW}	N

Radi lakše usporedbe s eksperimentalnim rezultatima i drugim numeričkim metodama, dijagrami su sistematizirani prvo po formama, zatim po Forudeovim brojevima i konačno po mjernoj veličini. Svaki dijagram prikazuje brod u uspravnom i nagnutom stanju za obje promatrane metode. Sistematičan prikaz svih rezultata priložen je u Prilogu 1. na kraju rada.

5. USPOREDBA REZULTATA

Metoda rubnih elemenata (*Boundary element method*) temelji se na teoriji potencijalnog strujanja. Linearna je i prilično robustna, ali relativno brza te se često primjenjuje u projektnoj brodograđevnoj praksi. Međutim, kao i svaka inženjerska metoda ona koristi neke pretpostavke i ograničenja kako bi vrlo složen problem pojednostavila, ali ipak zadržala dovoljnu točnost. Stoga, prilikom analize dobivenih rezultata nužno je poznavati početne pretpostavke i ograničenja kako bi se izlazni rezultati mogli pravilno tumačiti.

Pretpostavke i ograničenja teorije potencijalnog strujanja i linearne teorije valova su:

- Tekućina je idealna (nestlačiva i neviskozna)
- Napetost slobodne površine je zanemarena
- Strujanje u tekućini je bezvrtložno (2) (potencijalno strujanje)
- Amplituda vala ζ_a mala je u odnosu na valnu duljinu i dubinu vode
- Harmonijski progresivni val je raninski

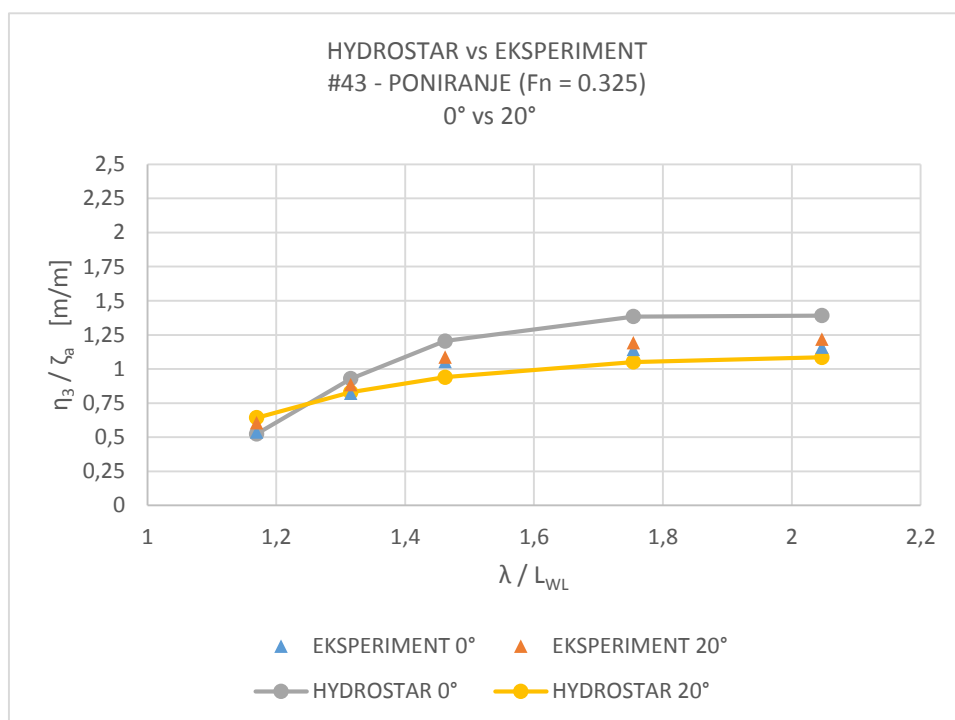
Uzimajući u obzir navedene pretpostavke provedena je analiza dobivenih rezultata:

Na temelju eksperimentalnih i numeričkih rezultata generalno može se zaključiti da se veličine poniranja, posrtanja i dodatnog otpora valova kod pojedine forme ne mijenjaju značajno u ovisnosti o kutu nagiba. Međutim zanimljivo je uspoređivati njihove promjene u ovisnosti o formi trupa i brzini broda. Forma *Sysser #43* plića je forma veće širine (omjer $B/T = 6.29$), dok je forma *Sysser #45* nešto uža i većeg gaza (omjer $B/T = 2.79$).

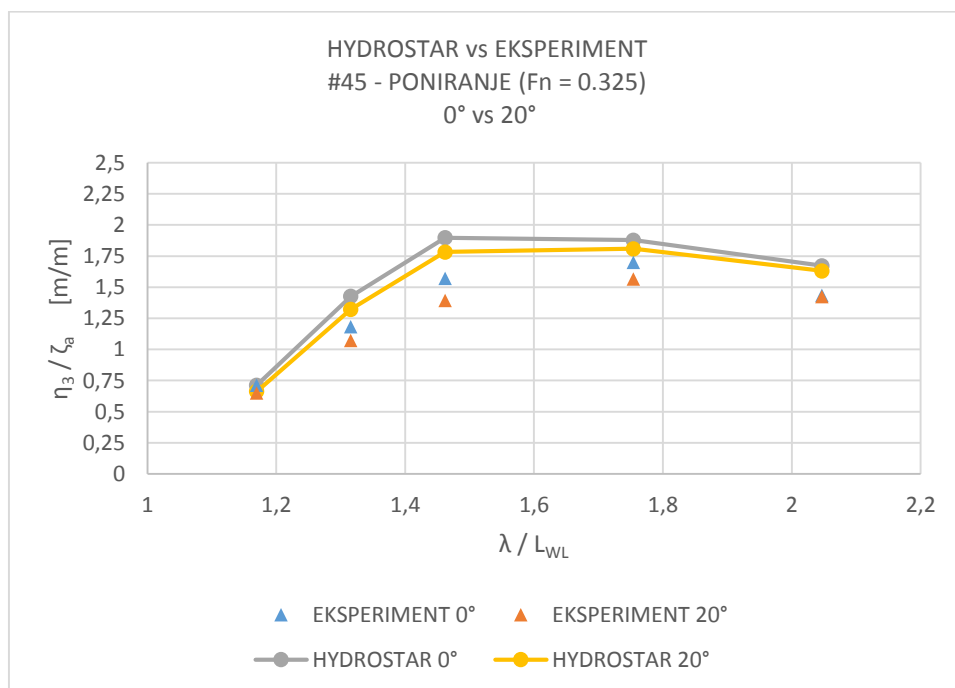
Šire i pliće forme manje će ponirati i posrtati na valovima, dok će uže i dublje forme imati manji otpor valova. Odzivi prvih značajno ne ovise o promjeni Froudeovih brojeva, dok kod drugih povećanjem Froudeovih brojeva iznos odziva će se smanjivati.

Uslijed nagibanja, pliće i šire forme imat će veće odzive poniranja i posrtanja pri manjim vrijednostima Froudeovih brojeva u odnosu na uspravno stanje, dok će im dodatni otpor valova pri većim brzinama značajnije ovisiti o valnim duljinama uzbudnih nailaznih valova. Kod užih i dubljih formi, odzivi poniranja i posrtanja bit će manji u nagnutom stanju, međutim za očekivati je da će nagib za posljedicu imati povećanje dodatnog otpora. Također zanimljivo

je primjetiti da razlike u iznosima dodatnog otpora valova između uspravnog i nagnutog stanja variraju ovisno o valnoj duljini.

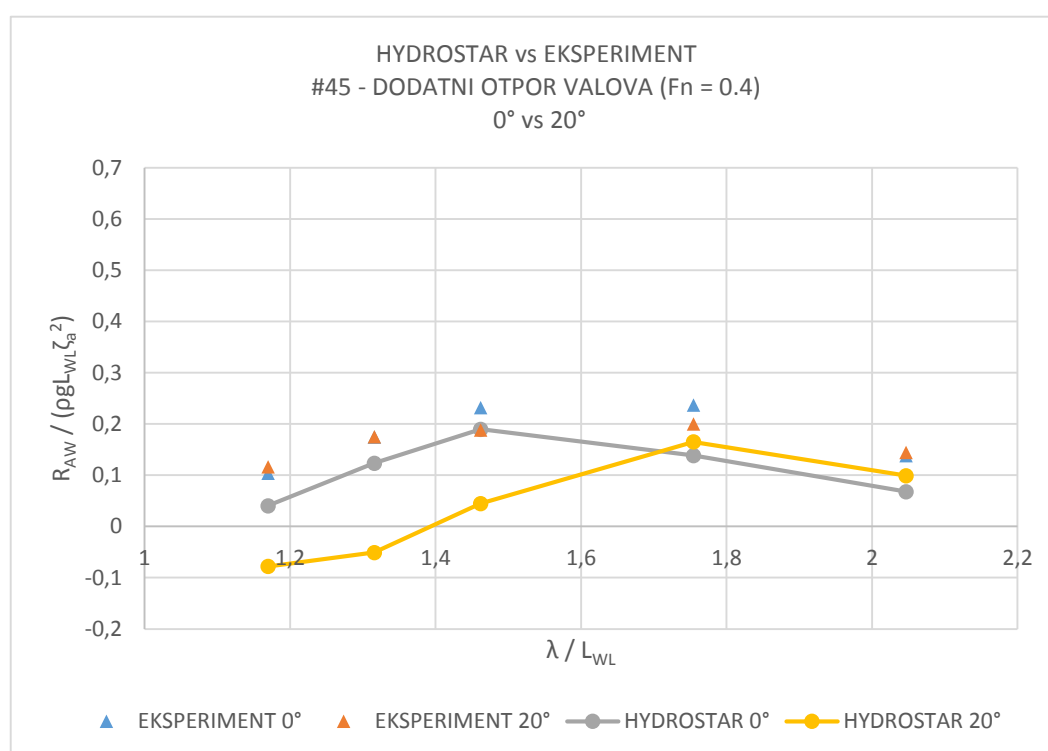


Slika 12. Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje



Slika 13. Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje

Kao što je već spomenuto, zbog linearnosti potencijalne teorije i početnih ograničenja, nije bilo za očekivati da će numerički rezultati dati kvantitativno točne rezultate. Međutim, iz usporedbe vidljivo je da je točnost numeričke metode bolja što je veća valna duljina, odnosno što je valna strmina manja. Kvalitativno gledano, trend krivulje numeričkih rezultata odgovara onom dobivenom eksperimentalnim putem, a točnost je bolja za uspravno stanje nego za nagnuti brod. Pojedine greške i značajnija odstupanja rezultata pojavljuju se isključivo kod nagnutih brodova, što navodi na zaključak da već spomenuta nesimetričnost mreže panela značajno utječe na rezultate.



Slika 14. Dodatni otpor valova za formu Sysser #45

Slika 14. prikazuje grešku procjene dodatnog otpora valova. Iako negativna predznak potsjeća na „sklizanje broda s vrha vala uslijed inercije“, vrlo vjerojatno radi se o pogrešci koja je posljedica izražene zakrivljenosti forme trupa jedrilice. Naime, za razliku od formi trgovačkih brodova koje su „kutijaste“ (s gotovo ravnim bokovima i dnom broda, te velikim paralelnim srednjakom), forma jedrilice zakrivljena je u dvije ravnine po cijeloj svojoj površini, što se ne uklapa u potpunosti u model proračuna *HydroSTAR* paketa.

6. ZAKLJUČAK

Analiza dostupnih eksperimentalnih rezultata [8] pokazuje da nagib broda ne utječe na njihanje broda značajnije. Međutim, zanimljivo je da se rezultati razlikuju kod različitih formi. Šire forme manjeg gaza imat će veće vrijednosti odziva poniranja, posrtanja i dodatnog otpora valova u nagnutom stanju, nego li kada plove uspravno.

Uže forme dubljeg gaza imati će veći odziv u uspravnom stanju, ali dodatni otpor valova bit će im neznatno veći u nagnutom stanju.

Grafička usporedba numeričkih metoda baziranih na teoriji potencijalnog strujanja u usporedbi s eksperimentalnom metodom pokazuje da potencijalna teorija kvalitativno dobro opisuje ponašanje jedrilice na valovima, međutim kvantitativno odudara od stvarnosti. Svejedno, imajući na umu prirodu potencijalne metode, ona je pogodna za usporedbu nekog novog projekta s već postojećim. Njezine glavne prednosti su brzina, jednostavnost i robustnost. Na temelju rezultata dobivenih programom HydroSTAR, mogućnost za unaprjeđenje metode rubnih uvjeta leži u daljenjem poboljšavanju postupka meširanja, posebno za trupove manjih brodova poput jedrilica.

Metoda koja je ostala neistražena, a budućnost je hidrodinamičkih simulacija, numerička je metoda viskoznog CFD-a. Budući da njeno korištenje zahtjeva iskusnog korisnika i veći opseg vremena, prednosti i mane njene primjene na forme malih brodova ostaje temom za buduća istraživanja.

LITERATURA

- [1] Čorić, V.; Prpić-Oršić J.: *Pomorstvenost plovnih objekata*; Zigo, Rijeka, 2006.
- [2] Fossati, F.: *Aero-hydrodynamics and the Performance of Sailing Yachts*, Adlard Coles, 2009.
- [3] Vitaljić, S.: *Biti brži*, Profil, Zagreb, 2003.
- [4] Larsson, L.; Eliasson, R.: *Principles of Yacht Design*. Adlar Coles, London. 2000.
- [5] Katgert, M.; Den Ouden, J.: *User Manual for the Delft Systematic Yacht Hull Series Database website*, Delft, 2009.
- [6] Keuning, J.A.; Vermeulen, K.J.; Have, H.P. : *An Approximation Method for the Added Resistance in Waves of a Sailing Yacht* ; MDY Madrid, March 2006
- [7] Gaillarde, G.; de Ridder, E.J.; van Walree, F.; Koning, J. : *Hydrodynamic advice of Sailing Yachts through Seakeeping Study* ; The 18th Chesapeake Sailing Yacht Symposium, Annapolis, Maryland; March 2007.
- [8] Bordogna, G. : *The Aero-Hydrodynamic Characteristics of Yachts Sailing Upwind in Waves*; Delft University of Technology, 2013.
- [9] Levandou, M. : *Added Resistance in Waves of Sailing Yacht* ; Delft Shiphydromechanics Laboratory; Delft University of Technology; 1995.
- [10] Oossanen, P. : *Predicting the Speed of Sailing Yachts* ; SNAME Vol 101; 1993.
- [11] Keuning, J.A.; Katgert, M. : *A Bare Hull Resistance Prediction Method Derived From the Results of the Delft Systematic Yacht Hull Series Extended to Higher Speeds* ; Delft Shiphydromechanics Laboratory; Delft University of Technology; 2008.
- [12] Bureau Veritas: *HydroSTAR for Experts– User Manual*; 2013
- [13] <https://sourceforge.net/projects/pdstrip/>
- [14] www.orc.org/rules

PRILOZI

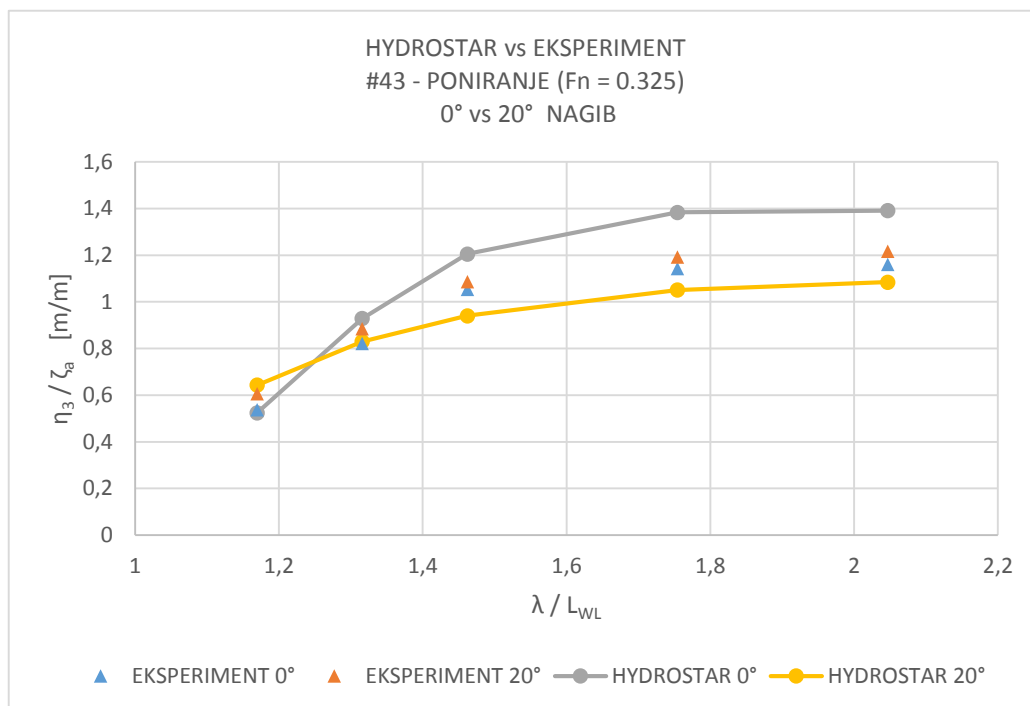
- I. Prikaz rezultata
- II. Približna metoda procjene dodatnog otpora valova
- III. CD-R disc

PRILOG I – Prikaz rezultata

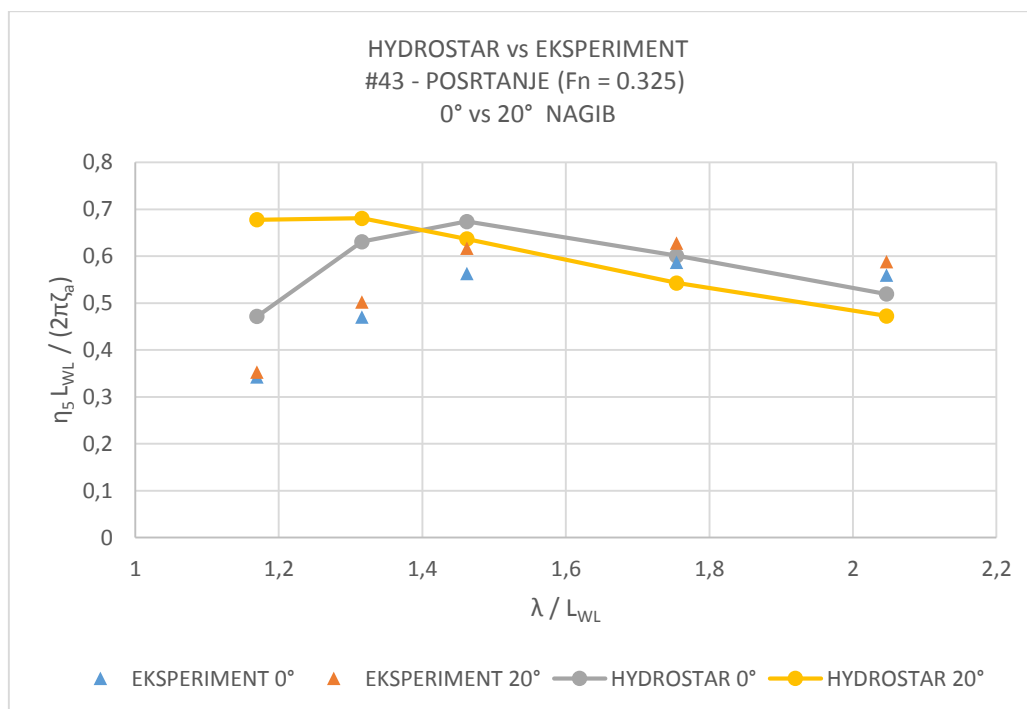
Dijagram 1.	Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Poniranje	35
Dijagram 2.	Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Posrtanje	35
Dijagram 3.	Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Dodatni otpor valova	36
Dijagram 4.	Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Poniranje	36
Dijagram 5.	Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Posrtanje	37
Dijagram 6.	Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Dodatni otpor valova	37
Dijagram 7.	Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Poniranje	38
Dijagram 8.	Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Posrtanje	38
Dijagram 9.	Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Dodatni otpor valova	39
Dijagram 10.	Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Poniranje	39
Dijagram 11.	Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Posrtanje	40
Dijagram 12.	Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Dodatni otpor valova	40
Dijagram 13.	Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Poniranje	41
Dijagram 14.	Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Posrtanje	41
Dijagram 15.	Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Dodatni otpor valova	42
Dijagram 16.	Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Poniranje	42
Dijagram 17.	Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Posrtanje	43
Dijagram 18.	Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Dodatni otpor valova	43
Dijagram 19.	Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Poniranje	44
Dijagram 20.	Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Posrtanje	44
Dijagram 21.	Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba – Dodatni otpor valova	45
Dijagram 22.	Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Poniranje	45
Dijagram 23.	Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Posrtanje	46
Dijagram 24.	Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba – Dodatni otpor valova	46

Usporedba proračuna u HydroSTAR-u s eksperimentalnim rezultatima

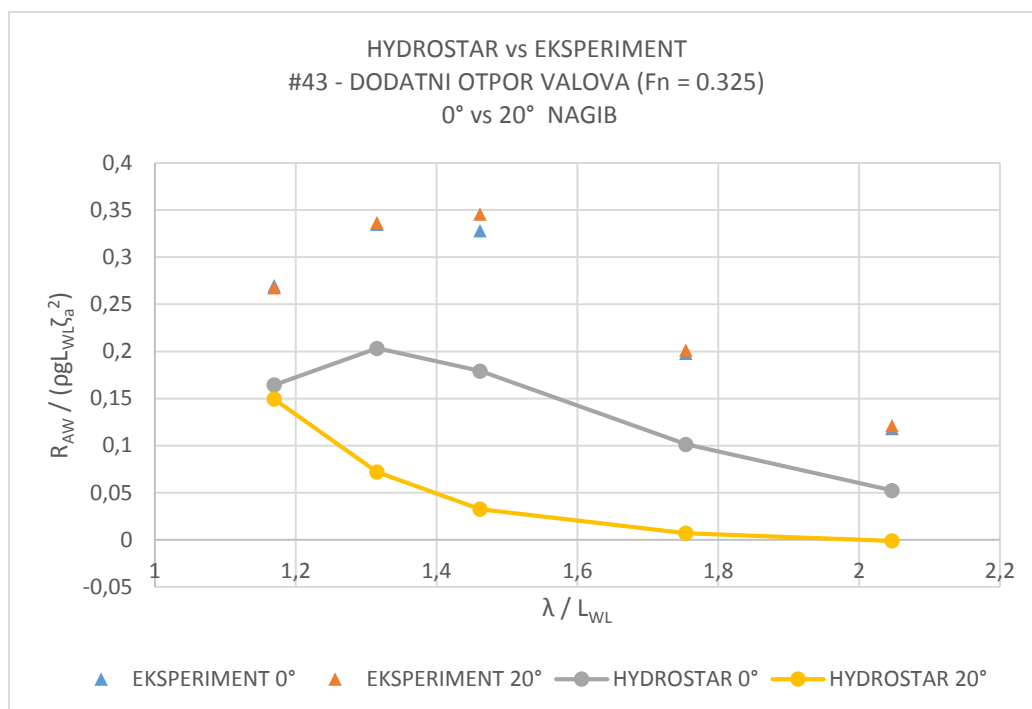
MODEL #43



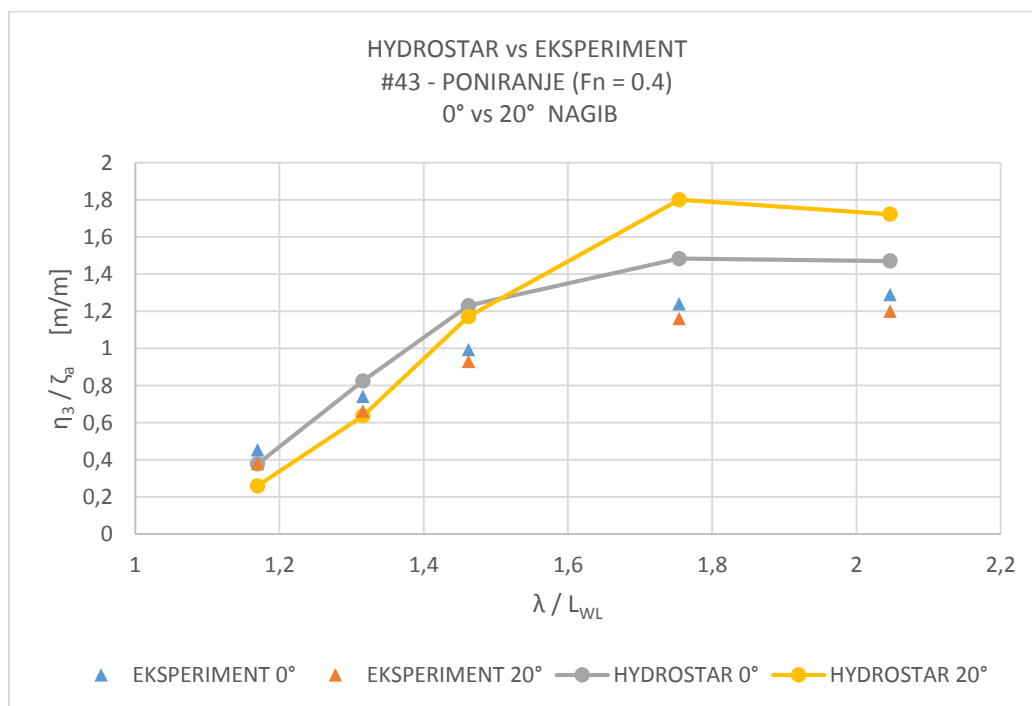
Dijagram 1. Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje



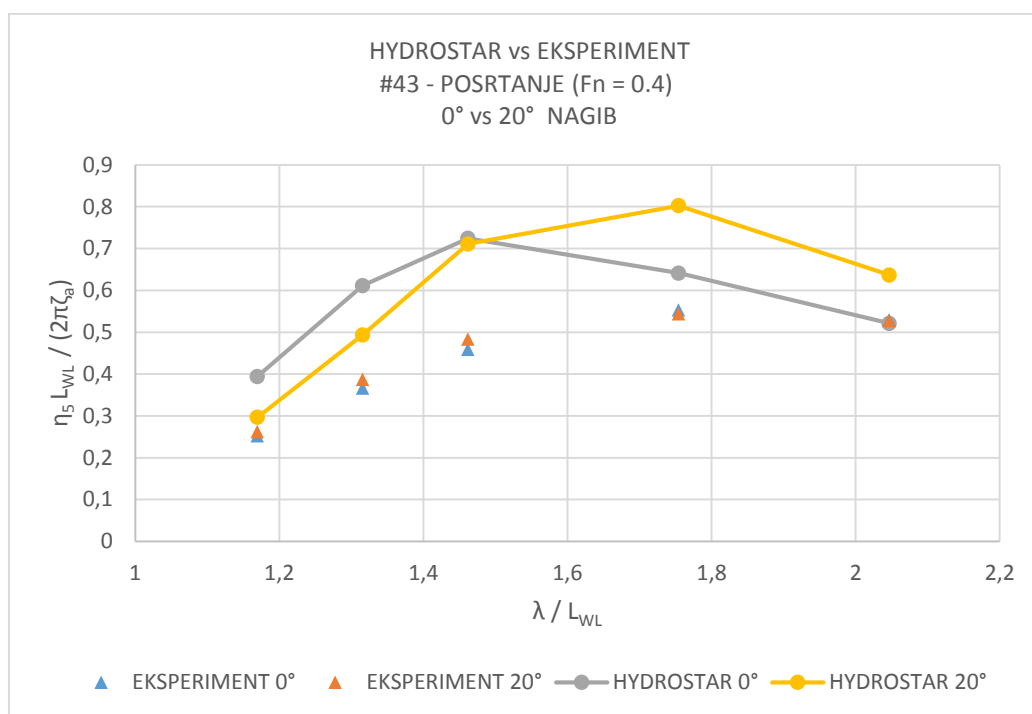
Dijagram 2. Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Posrtanje



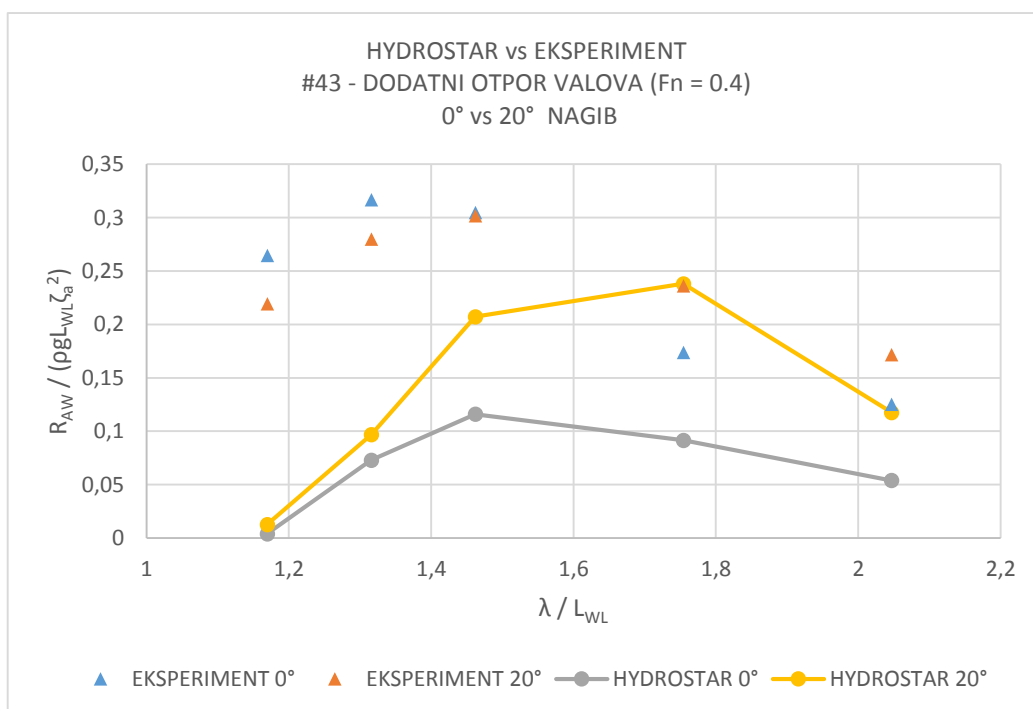
Dijagram 3. Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Dodatni otpor valova



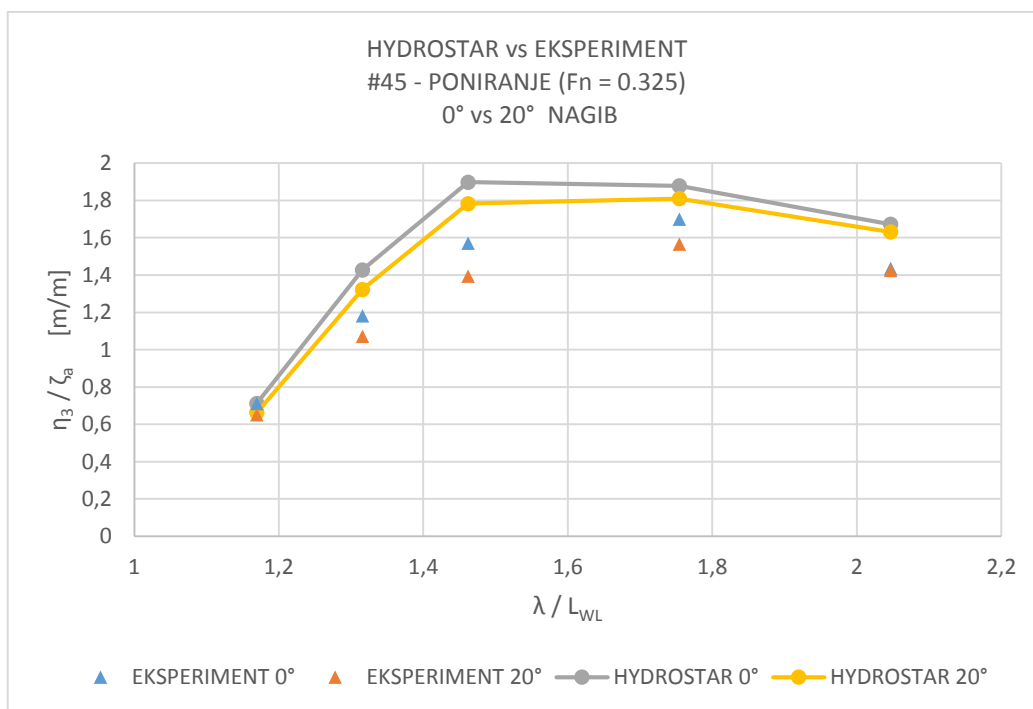
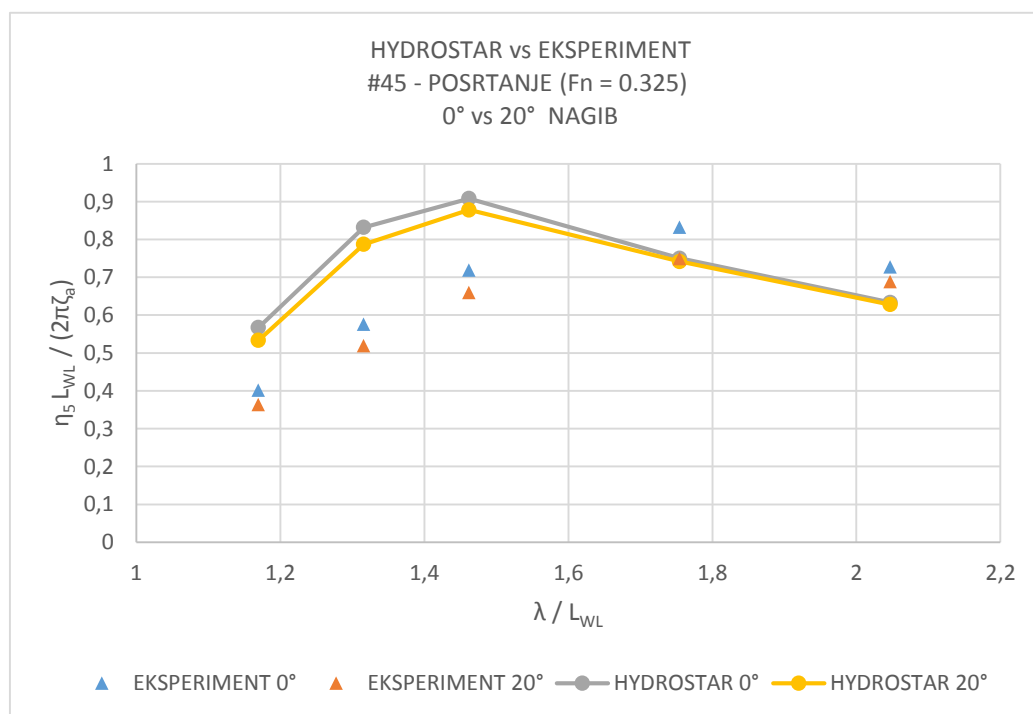
Dijagram 4 Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje

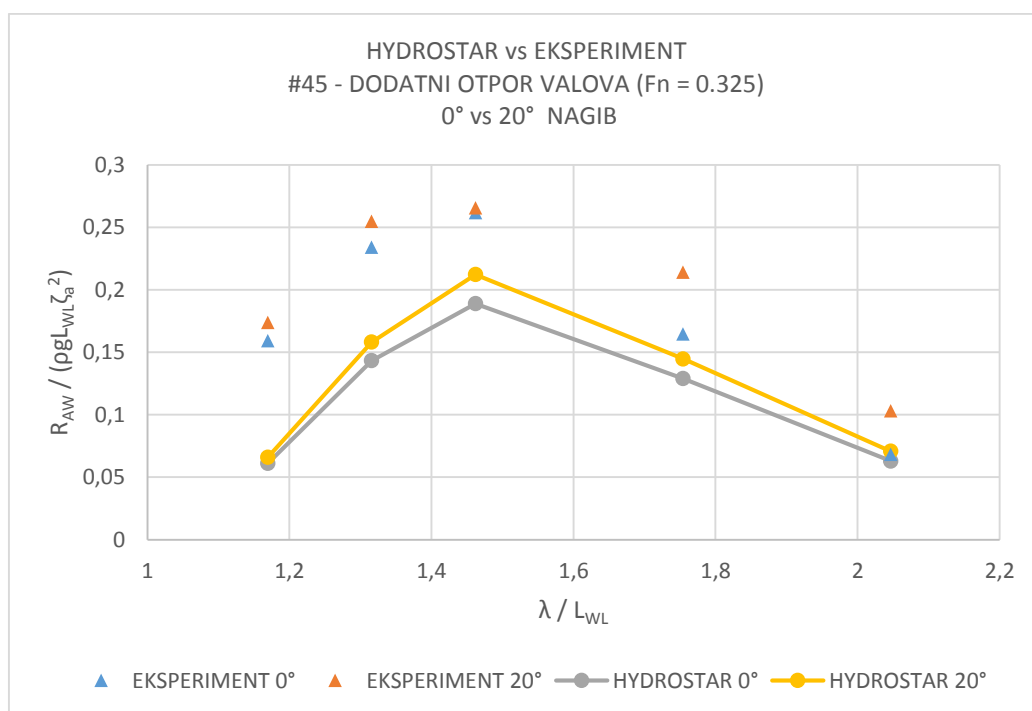


Dijagram 5. Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Posrtanje

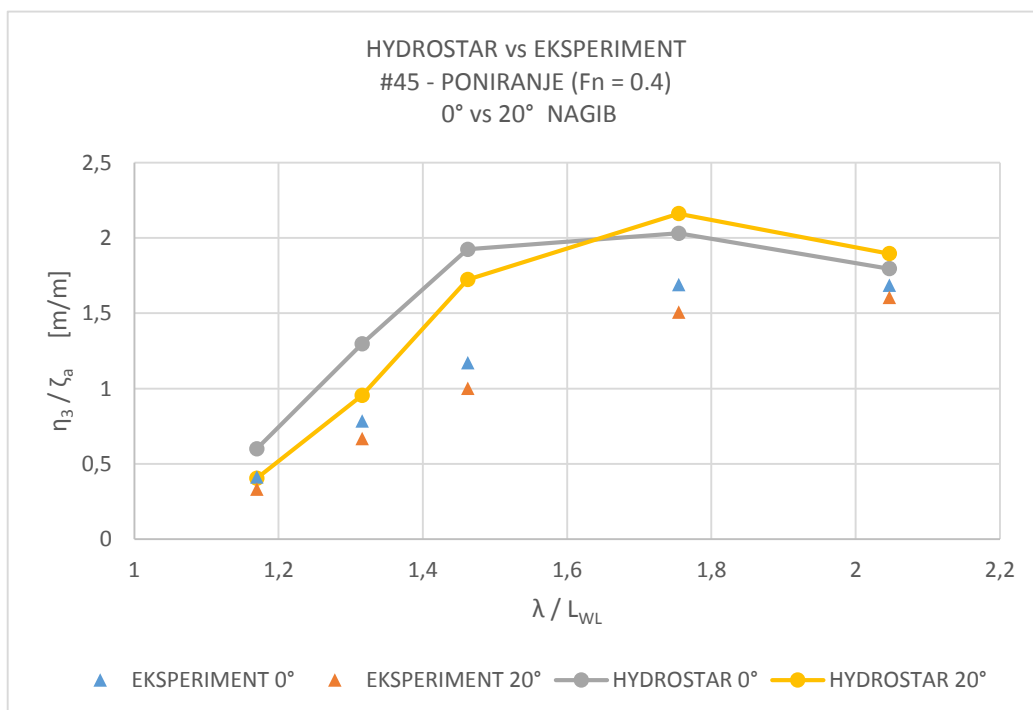


Dijagram 6. Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Dodatni otpor valova

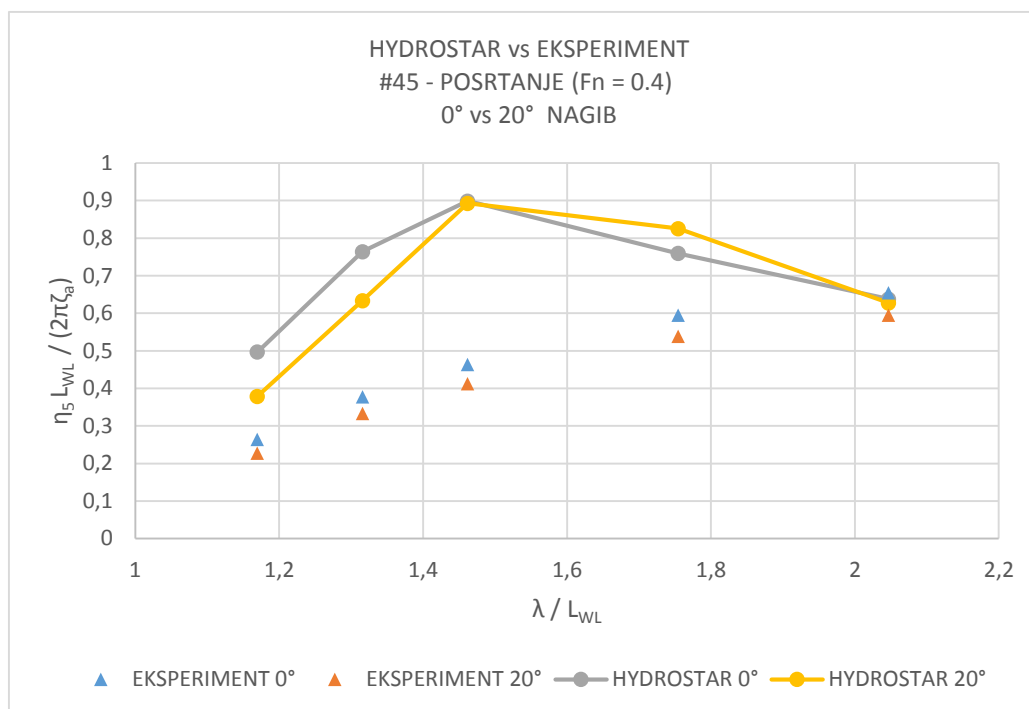
MODEL #45**Dijagram 7. Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje****Dijagram 8. Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Posrtanje**



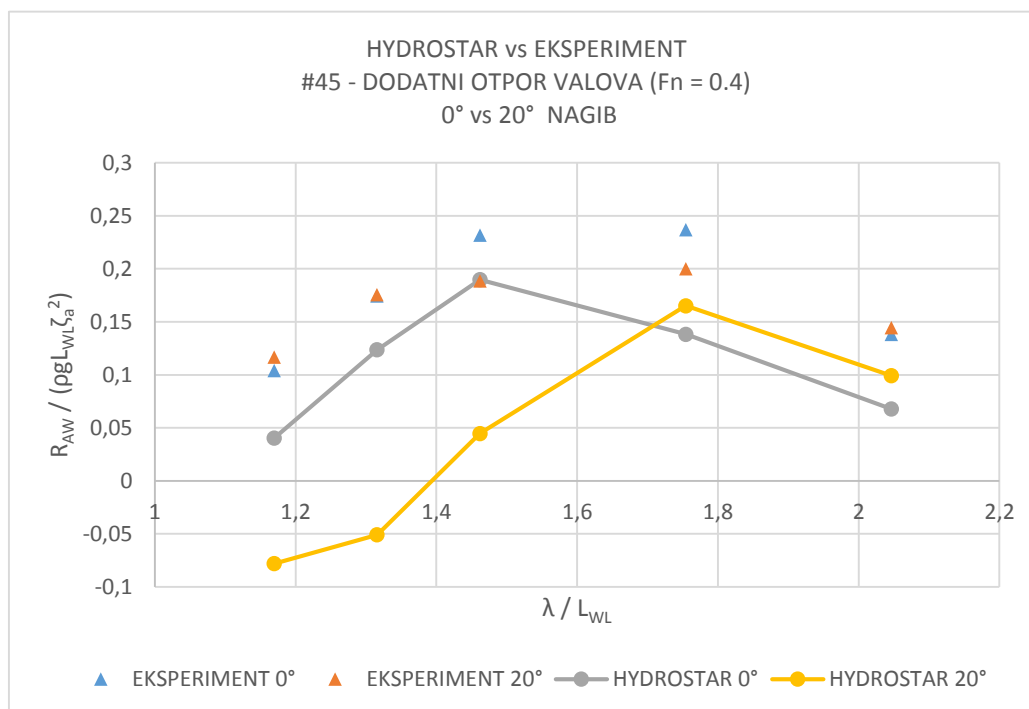
Dijagram 9. Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Dodatni otpor valova



Dijagram 10. Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje



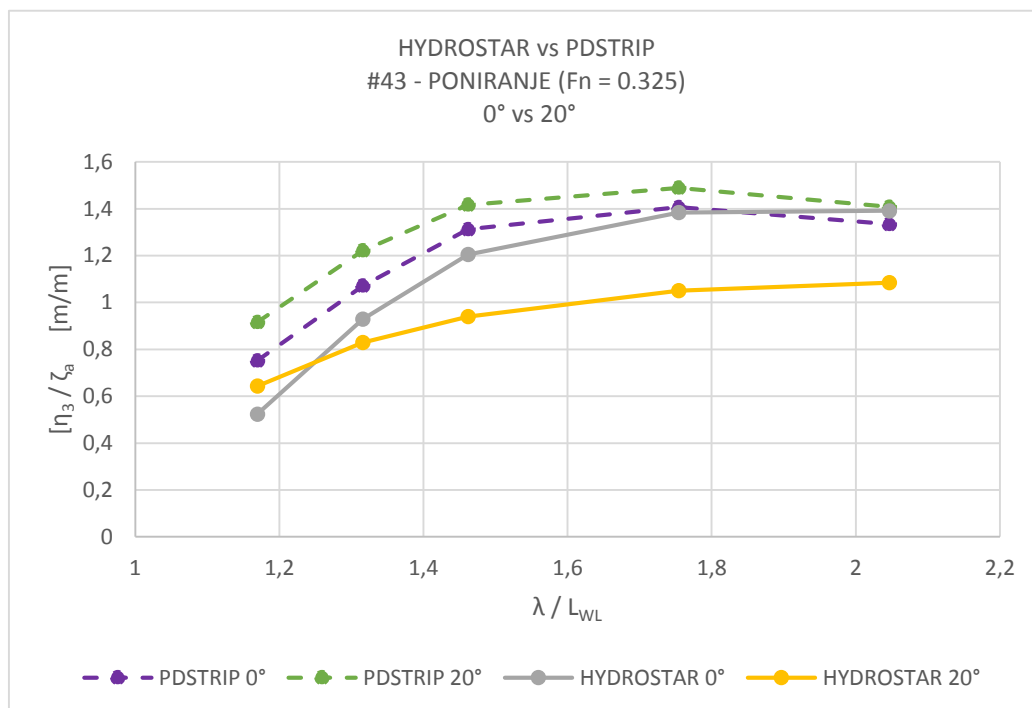
Dijagram 11. Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Posrtanje



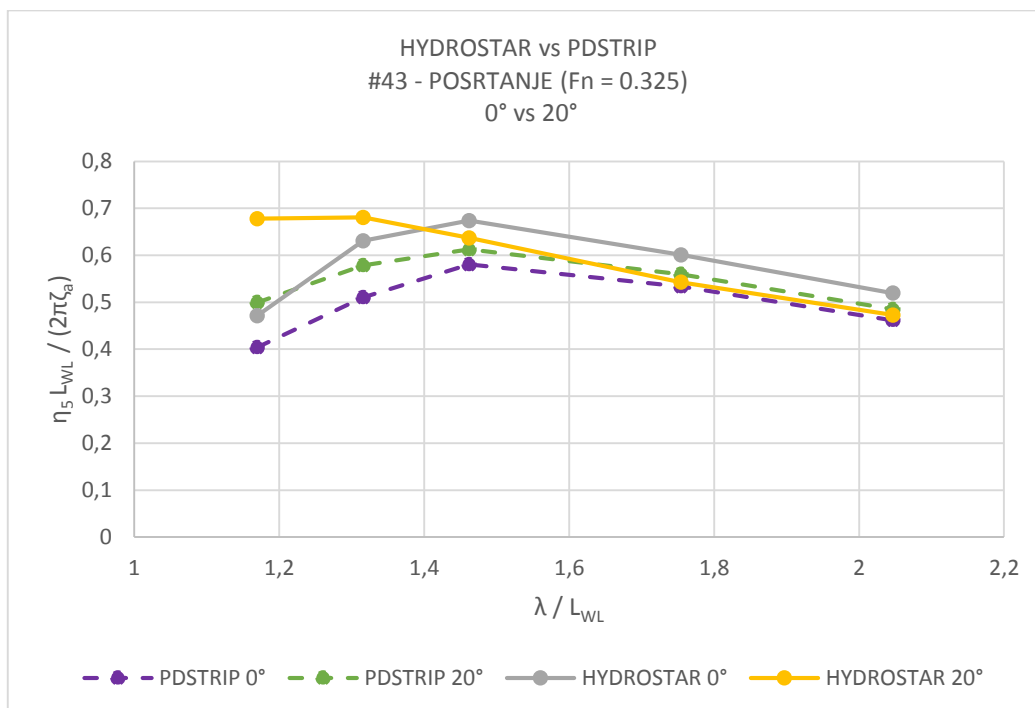
Dijagram 12. Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Dodatni otpor valova

Usporedba rezultata dobivenih programima *HydroSTAR* i *PDSTRIP*

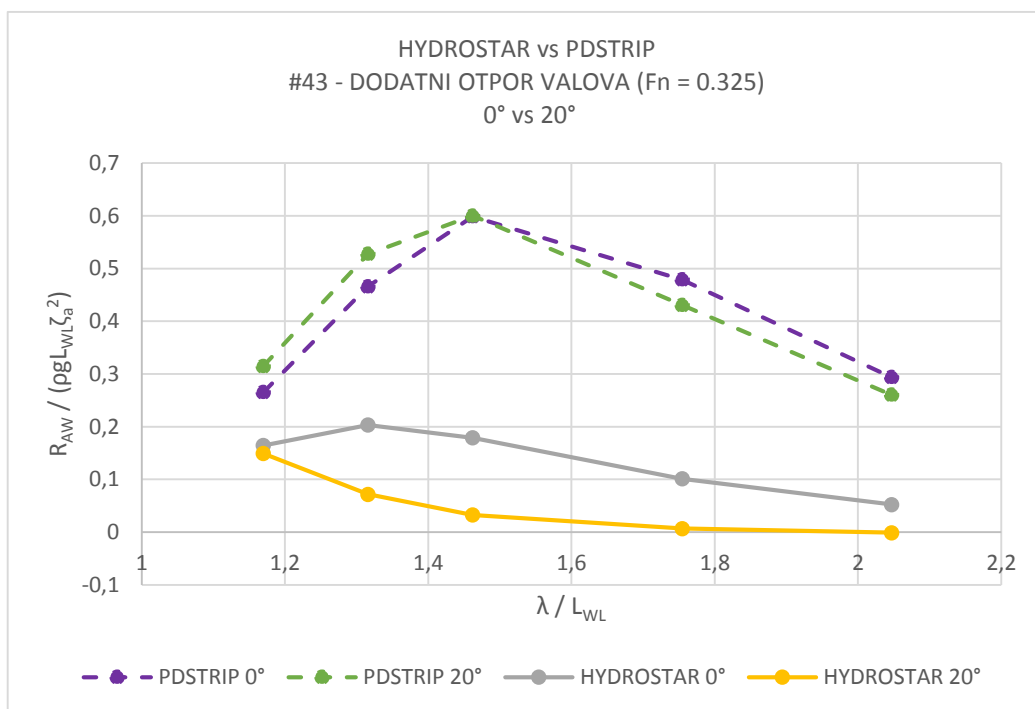
MODEL #43



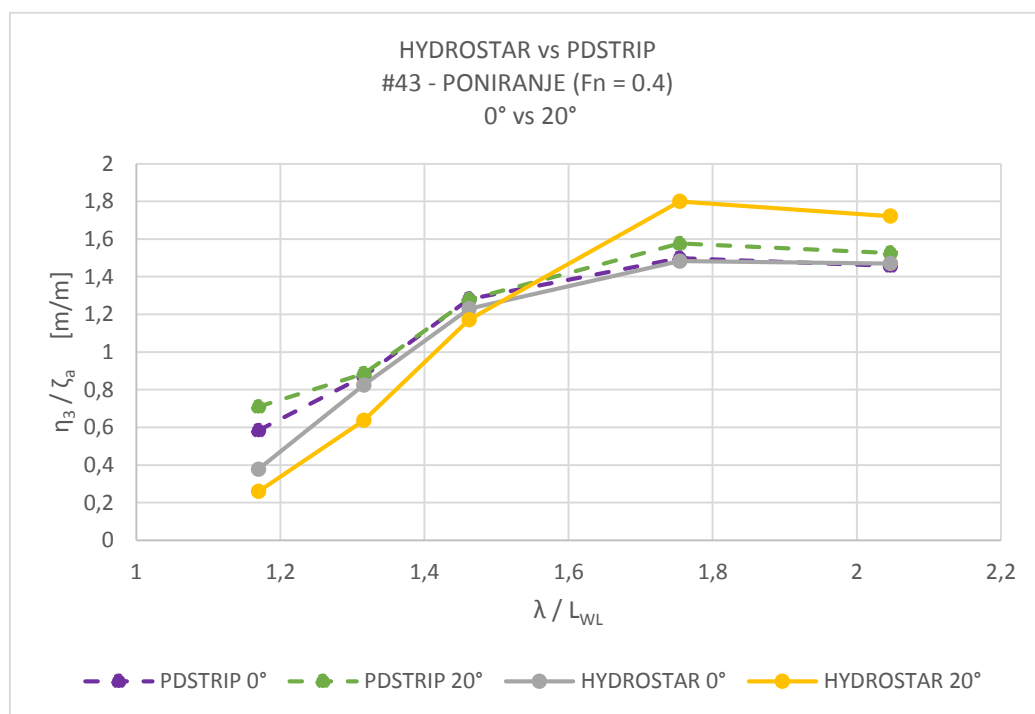
Dijagram 13. Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje



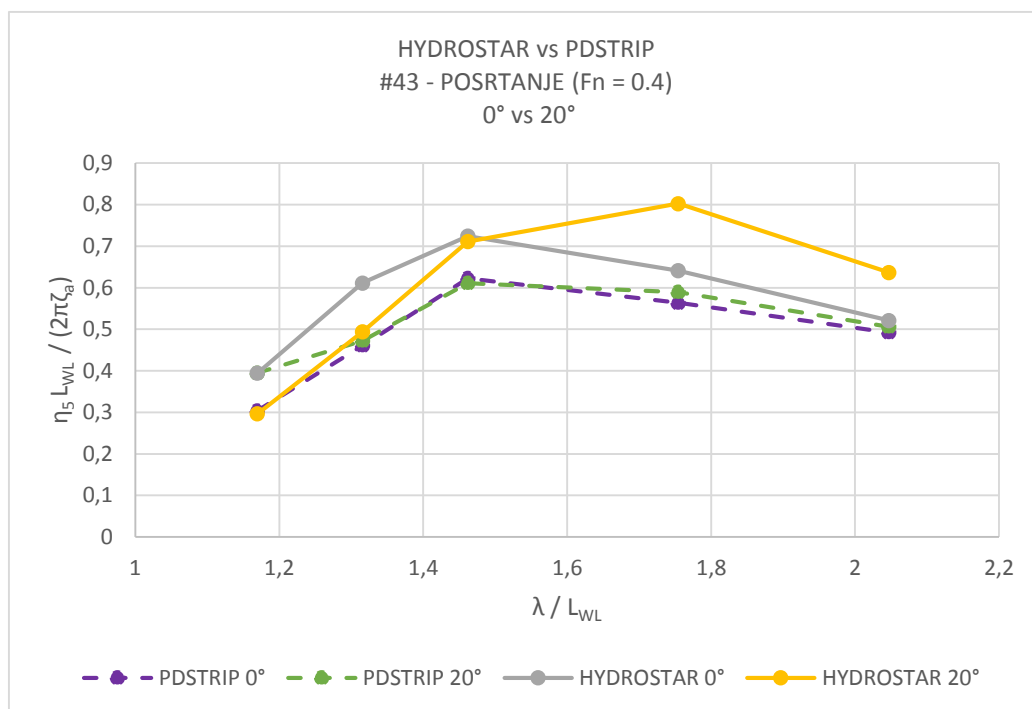
Dijagram 14. Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Posrtanje



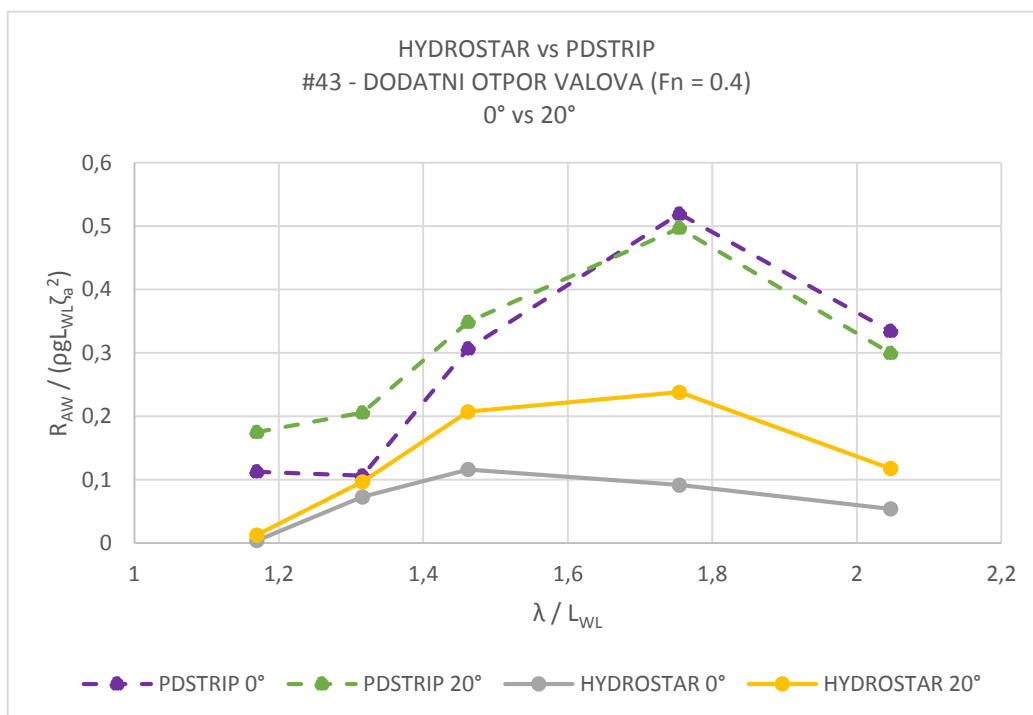
Dijagram 15. Sysser #43 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Dodatni otpor valova



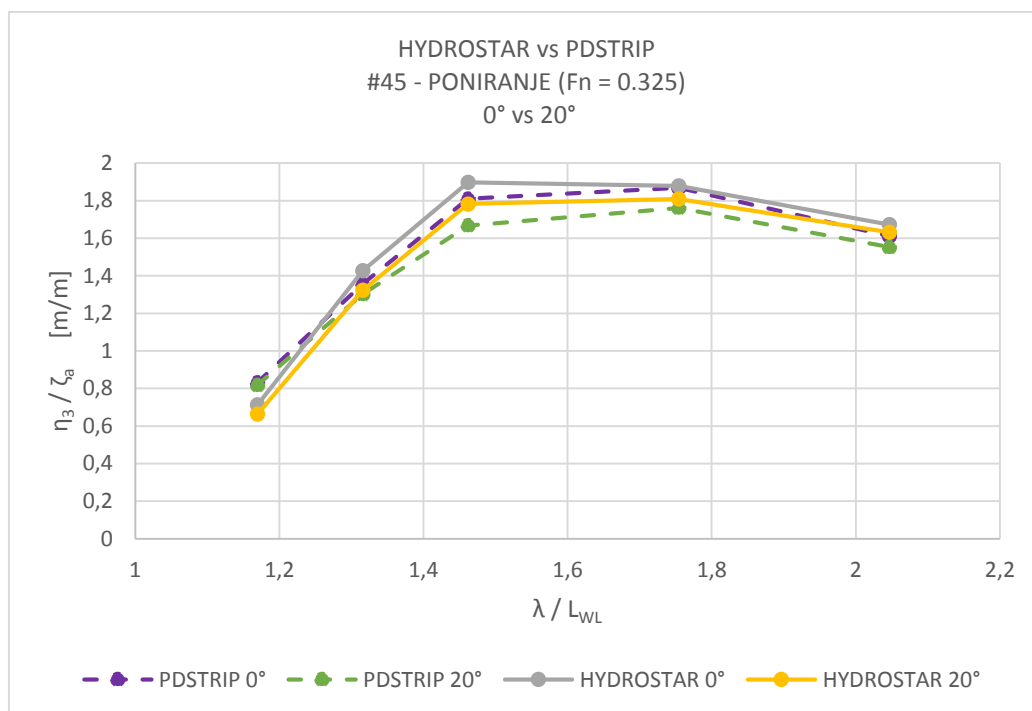
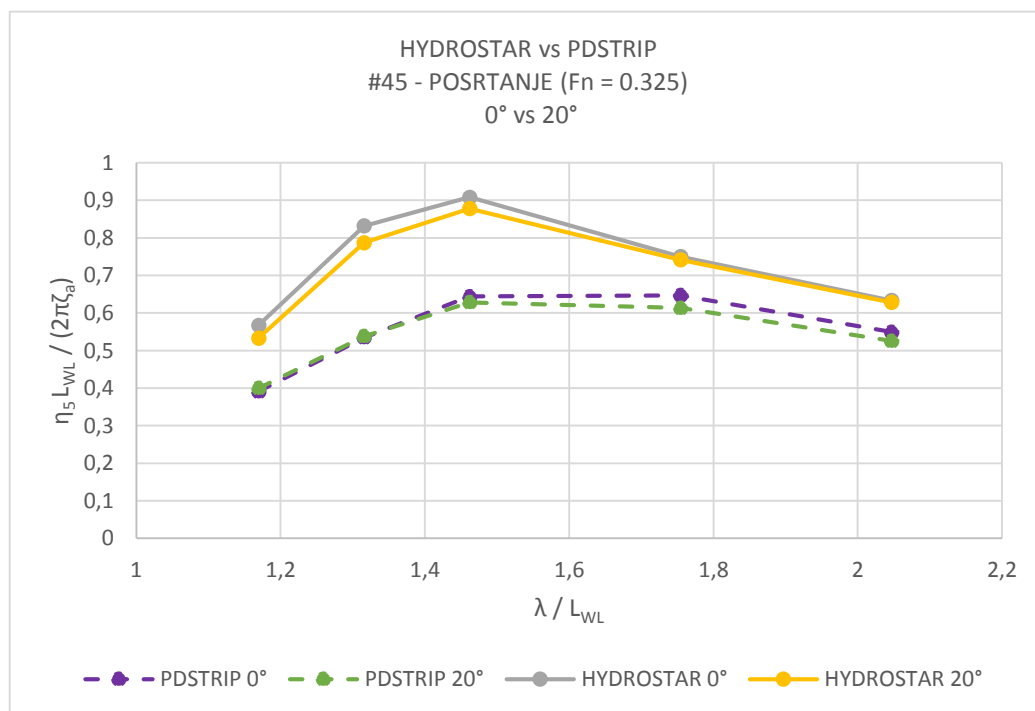
Dijagram 16. Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje

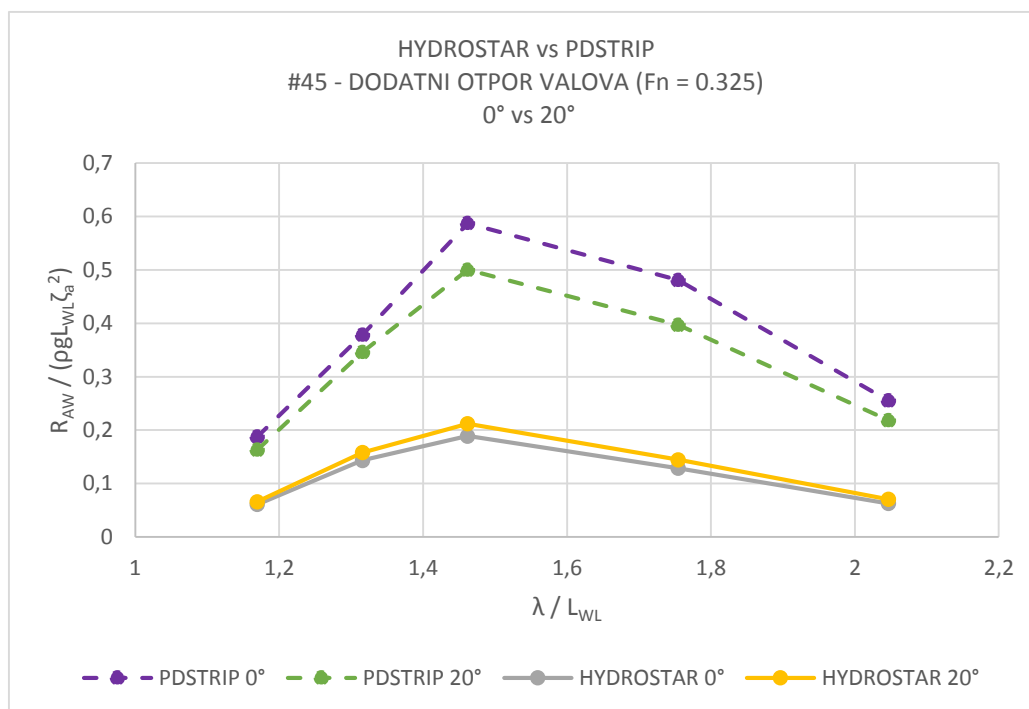


Dijagram 17. Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Posrtanje

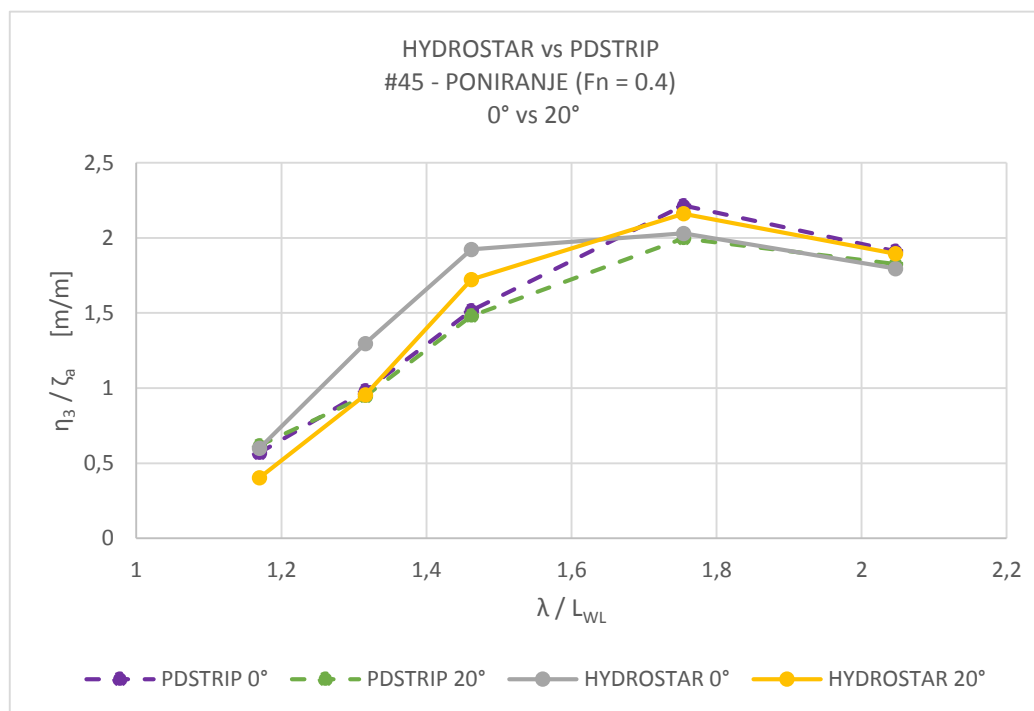


Dijagram 18. Sysser #43 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Dodatni otpor valova

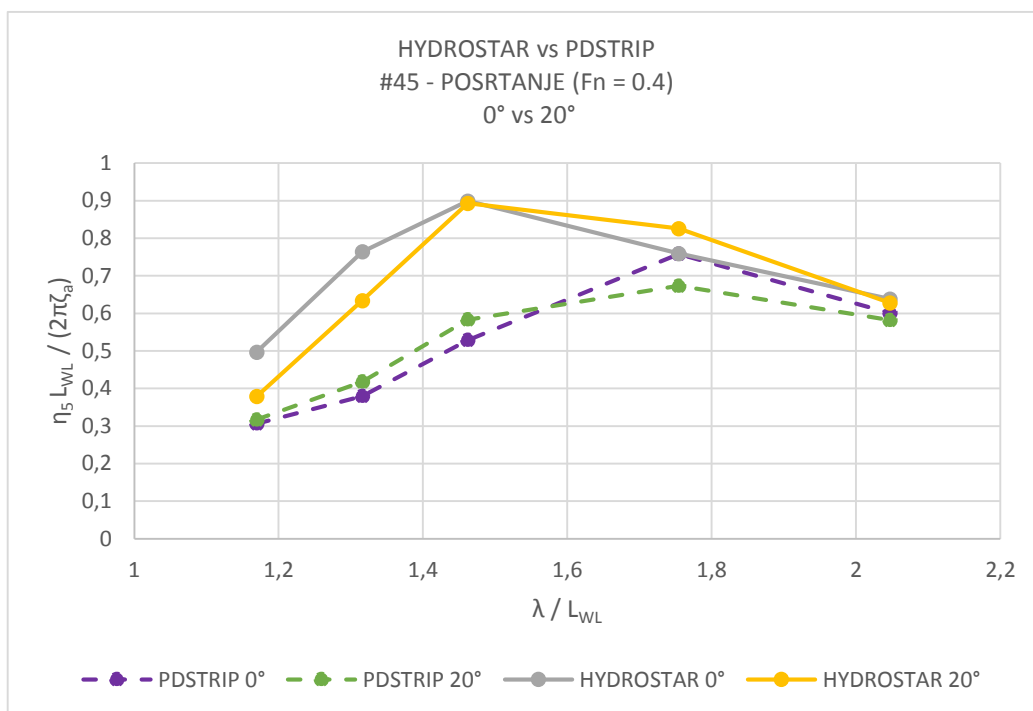
MODEL #45**Dijagram 19. Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje****Dijagram 20. Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Posrtanje**



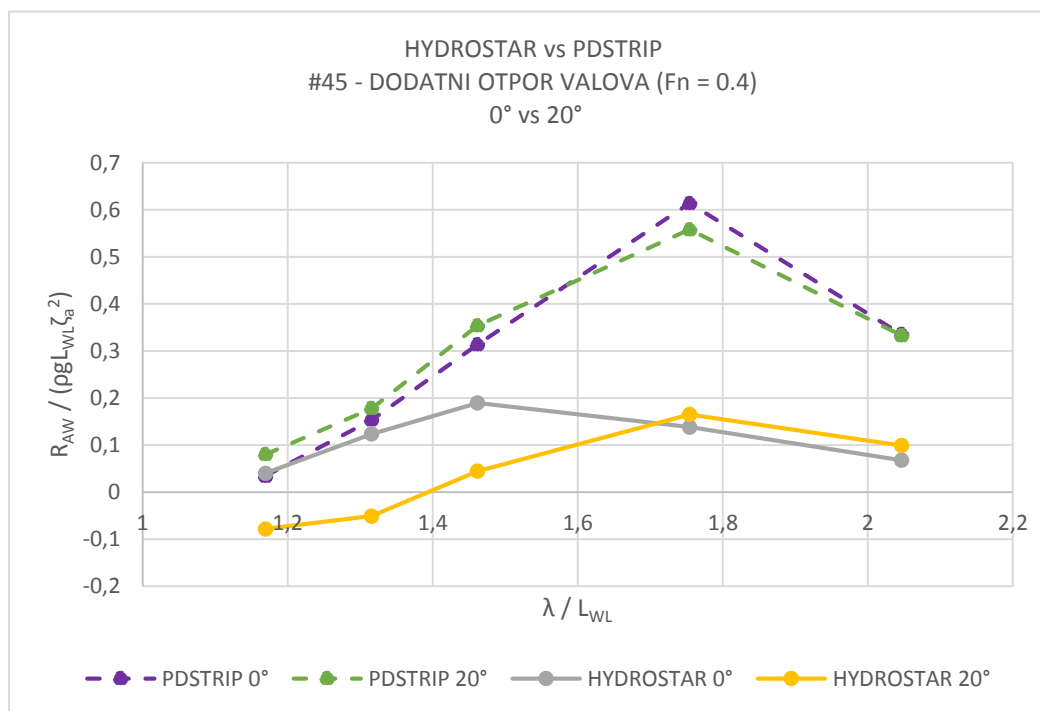
Dijagram 21. Sysser #45 – $F_n = 0.325$ – Uspravan vs 20° nagiba - Dodatni otpor valova



Dijagram 22. Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Poniranje



Dijagram 23. Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Posrtanje



Dijagram 24. Sysser #45 – $F_n = 0.4$ – Uspravan vs 20° nagiba - Dodatni otpor valova

PRILOG II – Približna metoda procjene dodatnog otpora valova

Metoda predstavljena u ovom Prilogu koristi polinomalni izraz dobiven na temelju eksperimentalnih rezultata *DSYHS* kako bi aproksimirala RAO operator dodatnog otpora valova za jedrilice. Članovi polinoma bitne su značajke forme trupa i sastavni dio izraza za izračun RAO opereratora.

Metoda je primjenjiva za sve uobičajene trupove jedrilica i za režim plovidbe (uvjete pokusa) sa sljedećim značajkama:

- Froudeov broj $Fn \in [0.2, 0.45]$, sa korakom od 0.05
- Kut nailaznih valova $\alpha \in [100^\circ, 180^\circ]$, sa korakom od 20°
- Poprečni moment inercije $k_{yy} \in [0.2L, 0.25L, 0.3L]$; L – duljina modela ili broda

Ovisno o omjeru L_W / L_S (gdje je L_W duljina vala, a L_S duljina broda ili modela) dani su koeficijenti polinoma a_i , $i = (0 \dots 9)$, dobiveni ekstrapolacijom.

Cijeli polinom definiran je u obliku:

$$\frac{R_{aw}}{\rho g L_{WL} \zeta_a^2} = a_0 + a_1 \left(\frac{L}{\sqrt[3]{\frac{1}{\nabla}}} \right) + a_2 \left(\frac{L}{\sqrt[3]{\frac{1}{\nabla}}} \right)^2 + a_3 \left(\frac{L}{\sqrt[3]{\frac{1}{\nabla}}} \right)^3 + a_4 \left(\frac{L}{B} \right) + a_5 \left(\frac{L}{B} \right)^2 + a_6 \left(\frac{B}{T} \right) + a_7 C_P + a_8 C_P^2 + C_P^3 \quad (1)$$

gdje su:

Tablica 1. Popis fizikalnih veličina za uspravno i nagnuto stanje

SYSSER #45			
Kut nagiba broda	Φ [°]	0°	20°
Kut nailaska vala	α [°]	180	180
Duljina na vodnoj liniji	L [m]	1.7281	1.7100
Širina na vodnoj liniji	B [m]	0.4159	0.4095
Gaz golog trupa	T_c [m]	0.1460	0.1465
Volumen istisnine broda	∇ [m ³]	0.0404	0.0404
Uzdužni prizmatički koeficijent	C_p	0.5504	0.5540
Bezdimen. Omjer	$L / (\nabla^{1/3})$	5.0346	4.9818
Bezdimen. Omjer	L / B	4.1554	4.1754
Bezdimen. Omjer	B / T	2.8478	2.7946
Dodatni otpor valova	R_{AW} [N]	Traži se	Traži se
Gustoća bazenske vode	ρ [kg/m ³]	1000	1000
Gravitacijsko ubrzanje	G [m/s ²]	9.81	9.81
Valna amplituda	ζ_a [m]	0.025	0.025

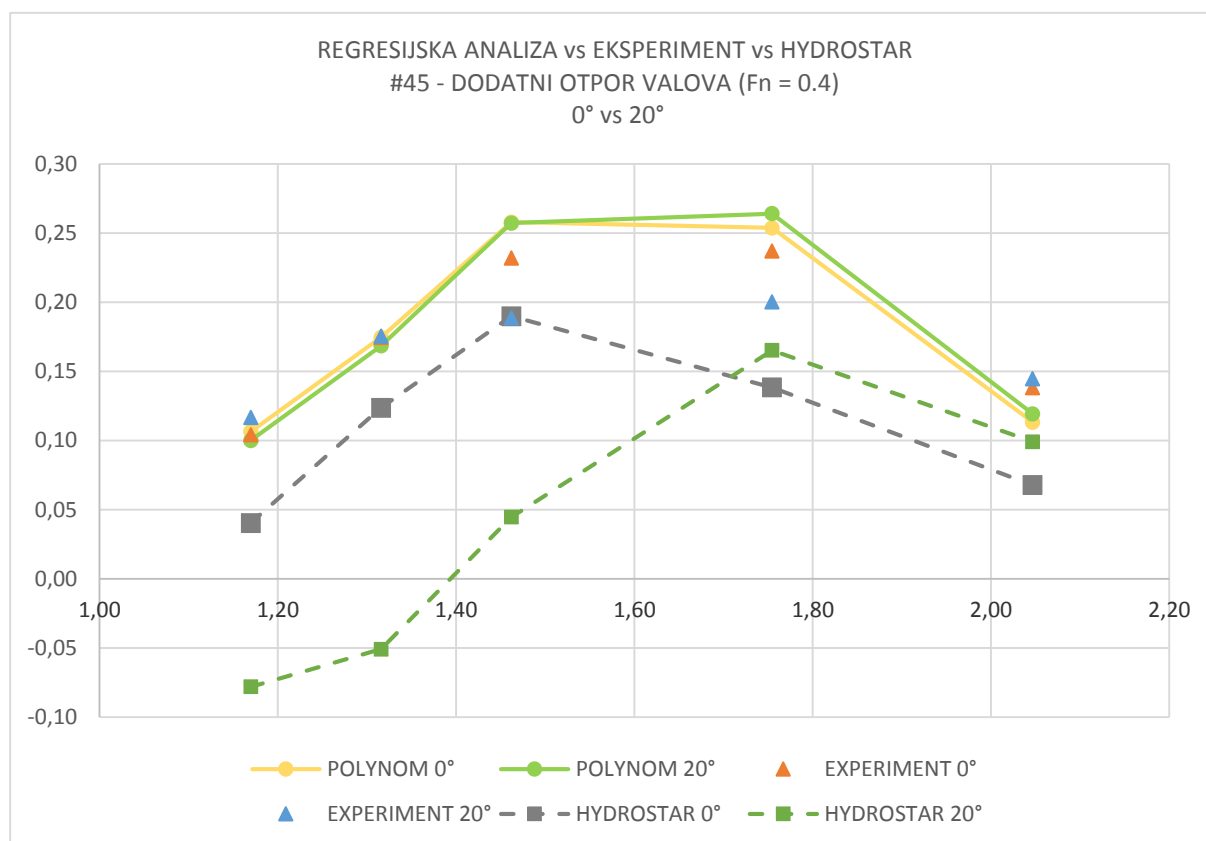
Na temelju polinoma i navedenih fizikalnih veličina, linearnom interpolacijom valnih duljina, izračunati su koeficijenti (Tablica 2.) i RAO operatori za polinomalnu metodu, te su uspoređeni s rezultatima eksperimenta i proračuna u HydroSTAR-u (Tablica 3. i Dijagram 1.).

Tablica 2. Vrijednosti izračunatih koeficijenata za pojedinu valnu duljinu nailaznog vala

Fn = 0.4 - Heel = 0° vs 20° - $k_{yy} \cdot L_{WL} = 0.25$											
L_{wv}	L_{wv} / L_{WL}	a₀	a₁	a₂	a₃	a₄	a₅	a₆	a₇	a₈	a₉
2	1.169591	-0.358101	0.354084	-0.025431	0.000262	-0.142495	0.009465	-0.008641	0.849190	-5.943879	6.474247
2.25	1.315789	-2.108208	1.278126	-0.176675	0.008007	-0.076773	0.001167	-0.006437	0.631036	-6.362360	7.207094
2.5	1.461988	-2.719181	1.510517	-0.242264	0.012298	0.003523	-0.003252	0.000869	0.941866	-3.729415	3.562118
3	1.754386	2.897864	-1.342888	0.165052	-0.007024	0.132991	-0.010359	0.011321	1.198372	0.629263	-2.558748
3.5	2.046784	3.244620	-1.426921	0.199180	-0.009334	0.057347	-0.005759	0.003979	0.315687	-0.179449	-0.447276

Tablica 3. Usporedbe izračunati RAO operatora pomoću sve tri metode

DODATNI OTPOR VALOVA					
POLYNOM		EXPERIMENT		HYDROSTAR	
RAO_{aw} - 0°	RAO_{aw} - 20°	RAO_{aw} - 0°	RAO_{aw} - 20°	RAO_{aw} - 0°	RAO_{aw} - 20°
0.106403	0.100041	0.104160	0.116712	0.040381	-0.078032
0.174617	0.168463	0.174454	0.175510	0.123636	-0.050831
0.257904	0.257186	0.231850	0.188537	0.189805	0.044661
0.253765	0.264029	0.237016	0.200155	0.138360	0.165185
0.113209	0.119234	0.138236	0.144658	0.067779	0.099135



Dijagram 1. Usporedba triju metoda za određivanje dodatnog otpora valova

Iako se smatra približnom, Dijagram 1. ukazuje da polinomalna metoda daje izuzetno dobre rezultate u predviđanju dodatnog otpora. Najveća mana metode je njena ograničenost s obzirom na kut nailaska vala, iznos polumjera tromosti te Froudeovog broja.

Od svih navedenih metoda, ova metoda daje rezultate najbliže onima dobivenim eksperimentalnim putem, što i nije neobično ako se uzme u obzir da je nastala baš na temelju specifične *DSYHS* serije. Također, ova metoda je najbrža, najpristupačnija i lako razumljiva svim korisnicima.